Aus der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik I
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. E. Körber
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

Untersuchungen zur Unterkieferbewegung mit Hilfe eines elektronischen, computergestützten Registriersystems (ECRS)

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Alexander Luckenbach
aus Heidenheim

1983

UNIV.
LIBRARY
ILL.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543922_0032

Aus der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik I
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. E. Körber
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

Untersuchungen zur Unterkieferbewegung mit Hilfe eines elektronischen, computergestützten Registriersystems (ECRS)

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Alexander Luckenbach
aus Heidenheim

1983

Dekan: Professor Dr. D. Plester
1. Berichterstatter: Professor Dr. E. Körber
2. Berichterstatter: Professor Dr. K. Dietz

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung 1

2. Überblick über den Stand der Technik 2

3. Literaturüberblick 5

4. Beschreibung des Systems 17

4.1. Bewegungsmeßmechanik 21
4.2. Befestigungsträger 24
4.3. Koordinatenbestimmungsmechanik 25
4.4. Schnittstellenschaltung 26
4.5. Computer 27
4.6. Peripheriegeräte 31
4.7. Computerprogramm 32
4.8. Mathematik 33

5. Methodik der Registrierung 38

5.1. Vorbereitende labortechnische Maßnahmen 38
5.2. Vorbereitungen am Probanden 38
5.3. Bestimmung des Infraorbitalpunktes 39
5.4. Montage der Bewegungsmeßmechanik 39
5.5. Unterkieferbewegungsregistrierung 40
5.6. Demontage der Registriervorrichtung 41
5.7. Berechnung der Unterkieferbewegung 42
5.8. Darstellung der räumlichen Kondylenbewegung 42
5.9. Darstellung der Bewegung eines beliebigen Unterkieferpunktes 42
5.10. Dokumentation der Ergebnisse 43

6. Eigene Untersuchungen 44

6.1. Artikulatorenvergleich 44

6.1.1. Herstellung der Versuchsmodelle 45
6.1.2. Einartikulieren der Referenzmodelle 45
6.1.3. Übertragung der Modellorientierung in die anderen Artikulatoren 46
6.1.4. Herstellung und Befestigung der paraokklusären Schienen am Modell 46
6.1.5. Versuchsdurchführung 48
6.1.6. Bestimmung der räumlichen Lage der beiden Referenzmodellsätze zur Scharnierachse 51
6.1.7. Ausmessen der konstruktionsbedingten Artikulatorparameter 53
6.1.8. Ausdrucken und Analysieren der ECRS-Ergebnisse 53

6.2. Ergebnisse des Artikulatorenvergleiches 55

6.2.1. Kondylenlokalisation 55
6.2.2. Interkondylarabstand 57
6.2.3. Maximale Längen der Kondylenbahnen 57
6.2.4. Grafikausdrucke der Kondylenbahnen 58
6.2.5. Bestimmung der Gelenkbahnparameter 61
6.2.6. Tabellarische Zusammenstellung 61
6.2.7. Statistische Auswertung der Ergebnisse 68

6.3. Registrierung am Probanden 69

6.3.1. Proband 69
6.3.2. Vorbereitende Maßnahmen 69
6.3.3. Scharnierachsen- und Kondylenlokalisation 70
6.3.4. Durchführung der Registrierungen 71
6.3.5. Entfernung der Bewegungsmeßmechanik und der Befestigungsträger 73
6.3.6. Bestimmung der Koordinaten der Unterkieferpunkte 73

6.3.7. Auswertung und graphische Darstellung 74
6.3.8. Bestimmung der Vergleichswerte des Probanden mittels Axiographie 75
6.3.9. Vergleich der ECRS-Ergebnisse mit den Axiographie-Ergebnissen 75

6.4. Ergebnisse der Registrierungen am Probanden 76

6.4.1. Kondylenlokalisation 76
6.4.2. Darstellung der Registrierungen 78
6.4.3. Vergleichende Projektion von Inzisalpunkt und Zahn 37 86

7. Diskussion 87

7.1. Beurteilung der Ergebnisse 87
7.2. Fehlerbetrachtung 92
7.3. Ausblicke 94

8. Zusammenfassung 96

9. Mathematischer Anhang 98

10. Literaturverzeichnis 100

Danksagung 105

1. Einleitung

Nicht wenige Erkrankungen im Kiefer- und Gesichtsbereich verändern im akuten Stadium und auch in der Folgezeit den Bewegungsablauf des Unterkiefers und die Unterkiefergrenzpositionen. Die dadurch entstehenden okklusalen Interferenzen können Störungen der Gesamtfunktion des stomatognathen Systems hervorrufen. Diese pathologischen Abweichungen in Verbindung mit anderen klinischen Befunden sicher beurteilen zu können, wird nur dann möglich sein, wenn der dreidimensionale Unterkieferbewegungsraum bekannt ist und auch individuelle Abweichungen von der Norm erkannt werden können.
Hierfür ist die individuelle, schädelbezügliche Bestimmung der dreidimensionalen Unterkieferbewegung erforderlich. Diese Registrierung geschieht bis heute meist mit Hilfe extraoraler, vollindividueller Gesichtsbögen (sog. Pantographen). Auch intraorale Registriersysteme wie der TMJ finden Verwendung. Allen gemeinsam ist die rein mechanische Übertragung der Bewegung einzelner, unveränderlich festgelegter Projektionspunkte über mehrere Schreibstifte auf in 3 Ebenen angeordnete Schreibplatten (sog. Pantographie-Platten). Auch bei den im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten entwickelten, auf dem Prinzip der elektronischen Wegmessung (potentiometrisch, induktiv, optoelektronisch) beruhenden Registriergeräten, wurde von diesem Konstruktionsprinzip (lineare oder vergrößerte Aufzeichnung der Bewegung bestimmter Punkte in den drei Ebenen des Raumes) Gebrauch gemacht (1,2,3,4,19).
Die Anordnung der Schreibstifte bzw. Schreibplatten impliziert einen nicht unerheblichen geometrischen Projektionsfehler, auf den später noch eingegangen werden soll. Bei reiner mechanischer Aufzeichnung, wie im Falle der oben erwähnten Pantographen, nimmt man den projektionsbedingten Aufzeichnungsfehler in Kauf, auch wenn die wahre Unterkieferbewegung verfälscht wird. Eine genaue Diagnostik der Kondylenbewegung ist deshalb nur bedingt möglich.

UNIV. KIEL

In der vorliegenden Arbeit wird ein von mir in den Jahren 1979 - 1981 entwickeltes völlig neuartiges, zahnärztliches, elektronisches, computergestütztes Registrier - System, nachstehend als ECRS bezeichnet, beschrieben. Es bestimmt erstmals mathematisch die räumliche Unterkieferbewegung, Scharnierachsenlokalisation, Bennett'sche Lateralbewegung, Gelenkbahnneigung und weitere zahnärztlich relevante Parameter. Die dadurch erreichte geometrische Allgemeingültigkeit der Bewegungsregistrierung, sowie die einfach zu handhabende, elektronische Meßapparatur, bringt viele Vorteile mit sich, die in dieser Arbeit ebenfalls diskutiert werden sollen. Anhand von 3 Artikulatoren sollen die ermittelten Daten überprüft und mit den an den Artikulatoren eingestellten, tatsächlichen Werten (Gelenkbahnneigung, Bennett-Winkel, Interkondylarabstand, etc.) verglichen werden. Darüberhinaus soll an einem Probanden die Anwendbarkeit des ECRS in der intrumentellen Funktionsanalyse aufgezeigt werden.

2. Überblick über den Stand der Technik

Jede Bewegung des menschlichen Unterkiefers wird durch die gelenkige Verbindung mit den starren Skeletteilen des Kopfes (Kiefergelenk), dem Band- und Sehnenapparat, den Muskeln und der Innervation ermöglicht. Nach HENERS (4) definiert man eine Bewegung durch die Beschreibung der Grenzbewegungen. Darunter versteht man die größtmögliche Umlaufbahn, die ein Meßpunkt am Bewegungsapparat unter festgelegten Bedingungen ausführen kann. Somit ist mit einer Beschreibung dieser Grenzbewegung eines Bewegungsapparates das System ebenfalls determiniert, d.h. alle anderen Bewegungen finden nur innerhalb des durch die Grenzbewegungen abgegrenzten Bewegungsraumes statt. Eine Abweichung bzw. Veränderung dieser räumlichen Bewegungsgrenzen muß deshalb als pathologische Veränderung angesehen

werden. Der Unterkiefer, der für die hauptsächlichen Bewegungen im Kausystem verantwortlich ist, zeigt räumlich ablaufende Bewegungsmuster. Somit lassen sich auch die Grenzbewegungen in den 3 Raumebenen orthogonal aufzeichnen:

Frontal - Horizontal - Sagittal.

Die Hauptbewegungsrichtung erfolgt in der Sagittalebene als kombinierte Rotations- und Vorschubbewegung.

Diese Bewegungen werden in der Praxis bis heute mit rein mechanisch aufzeichnenden Geräten registriert (Pantographie) (37,38).

Pantographen, wie z.B. Stuart, Denar, Panadent, Lee, usw., liegt eine Hebelgestänge-Konstruktion zugrunde. Naturgemäß verfügen mechanische Vorrichtungen dieser Art über eine eingeschränkte Genauigkeit. Schnelle Bewegungen werden infolge der Trägheit der Apparatur und auch durch Reibungsverluste mehr oder weniger verfälscht wiedergegeben. Eine mechanische Rückwirkung auf das Kausystem durch das relativ schwere Hebelgestänge bleibt nicht aus. Dies hat eine Änderung der tatsächlichen Bewegungsbahn zur Folge, wodurch es zu einer Fehlregistrierung kommt.

Als weiteren Nachteil der pantographischen Verfahren sei die konstruktionstechnische Anordnung der Schreibstifte bzw. Schreibplatten angeführt, die wie schon erwähnt, einen erheblichen geometrischen Projektionsfehler nach sich zieht, da sie außerhalb des eigentlichen Bewegungszentrums die Bewegungen des Unterkiefers aufzeichnet.

KUBEIN, KRÜGER, STACHNISS (33) stellten hierzu folgendes fest:

"Bei reiner Protrusion erfolgt in den sagittalen Ebenen eine Aufzeichnung ohne projektionstechnische Fehler. Auf den frontalen und horizontalen Platten wie in allen Ebenen bei Lateralbewegungen kommt es zu sphärischen Verzeichnungen. Es ist nicht einfach, diese zu deuten, da bei allen Ebenen die Achsen rotieren und sich ständig verändern.... Bei Bewegungen mit lateraler Komponente laufen in der Regel alle einzelnen Kiefergelenks- und Okklusal-Führungen in

räumlichen Kurven ab, wobei jeder einzelnen Führung oder Bewegungsspur eines jeden Punktes eigene Bewegungsebenen mit entsprechenden Rotationsachsen und -zentren zuzuordnen sind. Für alle Darstellungen von Kieferbewegungen mit lateraler Komponente müßte deshalb bei der pantographischen Registrierung eine Projektionsbereinigung erfolgen."

Eine Ausschaltung dieser Projektionsfehler ist nur durch die Entwicklung eines andersartigen Aufzeichnungssystems möglich, das in der Lage ist, räumliche Kurven zu zeichnen bzw. zu gravieren. Dies würde jedoch die Meßmechanik weiter verkomplizieren.
Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war damit gegeben, ein Verfahren zu entwickeln, das eine verzeichnungsfreie, geometrisch eindeutige, räumliche Darstellung bzw. Projektion der Bewegungsbahnen von Kondylen und anderen Unterkieferpunkten ermöglicht. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit der Applikation mathematischer Methoden.

3. Literaturüberblick

Die ersten Anwendungen elektronischer Verfahren bei der Registrierung der Unterkieferbewegung reichen bis in die Mitte der 60er Jahre zurück.

BEWERSDORF (1) hat 1967 mit seinem Beitrag über Elektrognathographie erstmals elektronische Verfahren zur Registrierung von Kieferbewegungen angewandt. Anfängliche Versuche mit Kinematographie (Bildverstärker) und Photogrammetrie gab er bald auf, da sie nicht zu dem gewünschten Erfolg führten. Es gelang ihm die Entwicklung einer Meßapparatur, die aus einzelnen, in den drei Ebenen des Raumes angeordneten, elektronischen Resolvergruppen (induktive Weg- und Winkelgeber) aufgebaut war. Die Meßmechanik wurde durch eine Drahtligatur mit dem Unterkieferzahnkreuz verbunden. Die Kompensation der sich während der Registrierung nicht vermeidbaren Kopfbewegungen der Testperson wurde durch eine zusätzliche Resolvermechanik, die die Positionsänderung des Oberkiefers registriert, erreicht. Nach Aufbereitung der einzelnen Signale der Resolver in einem Phasendetektor wurden die Meßwerte auf einem XY-Schreiber registriert. Das Elektrognathogramm (EGG) bestand aus drei durch den XY-Schreiber gezeichneten Papierstreifen (X-,Y-, Z-Komponente). Diese EGG's erlaubten Aussagen über Zentrik, Ruhelage, Grenzen der Kieferbeweglichkeit, leere Gleitbewegungen und Kauzyklen bei verschieden harter Kost.

1969 ging BEWERSDORF (2) einen Schritt weiter, indem er die EGG's durch einen Computer auswerten ließ. Die Eingabe erfolgte über einen Digitizer. Das Computerprogramm beschränkte sich auf die Analyse der Kauzyklen, wobei die Einwirkung verschiedener Festspeisen auf den Kauverlauf, Vergleich der Ergebnisse von gleichartigen Kauvorgängen in verschiedenen Zeitabständen sowie der Zubeißwinkel genauer untersucht wurden. Die Ungenauigkeit der Meßmethode, hauptsächlich bedingt durch Kopfbewegungen und Auswertungsfehler

lagen nach Angaben des Autors bei Öffnungsbewegungen kleiner als 5 mm bei ± 0,3 mm und bei größeren als 20 mm bei ± 1mm.
Die räumliche Bewegung wurde analog zu den gemessenen Bewegungsvorgängen ermittelt. Es fehlte somit die mathematische Erfassung.

Eine sehr ähnliche Studie veröffentlichte KÖRBER 1971 (3). Er bediente sich wie BEWERSDORF präziser Miniatur-Drehbewegungswandler. Die Linearbewegungen eines Meßpunktes wurden über einen Zeiger in Drehbewegungen umgesetzt. Der entscheidende Fortschritt seiner Meßmethodik bestand in der Unabhängigkeit der Registrierung von Kopfbewegungen der Testperson.
Dies erreichte er durch die Montage von neun Potentiometern auf einer 500g schweren Meßplattform, die am Oberkiefer und Unterkiefer über periokklusale Schienen befestigt wurden. Voraussetzung für die Registrierung war die Ermittlung der Rotationszentren der Kiefergelenke mit Hilfe eines separaten Scharnierachsenlokalisators. Danach mußten die Meßwertaufnehmer gegeneinander dreidimensional ausgerichtet werden. Die analogen Meßwerte der linearen Drehpotentiometer wurden über einen Trägerfrequenzmeßverstärker simultan einem Oszilloskop und einem XY-Schreiber zugeführt. Der Meßverstärker erlaubte eine beliebige Vergrößerung der Bewegungskurven (Mikroskopie von Bewegungsbereichen) auf dem XY-Schreiber. Bei Simultanregistrierungen aller 9 Kanäle (Potentiometer) lieferte die Meßanordnung 6 einzlene Bewegungsbahnen:
1. Kondylenbahn rechts 2. Kondylenbahn links
3. Lateralbewegung des Kondylus rechts
4. Lateralbewegung des Kondylus links
5. Vertikal-Lateral-Bewegung des Inzisalpunktes
6. Bewegung des Inzisalpunktes in der sagittalen Ebene.
Für die Registrierung der Öffnungsbewegung und der "reinen Rotation", sowie zur Bestimmung der Vertikaltoleranz des Kiefergelenkes wurden gesonderte Vorrichtungen konstruiert.

Abschließend beschäftigte sich der Autor noch mit der Dynamik der Unterkieferbewegung, wobei er mit Hilfe der beschriebenen Meßmethode Anzeichen der Skelettmuskelschwingung in der Ruhelage der Kaumuskulatur nachweisen konnte. Nach Angaben des Autors betrug die Auflösung der Meßanordnung am Artikulator 5 µm über die Registrierbreite von 20 cm.
Auch hier wurde die Unterkieferbewegung nicht mathematisch erfaßt und verarbeitet. Die Registrierung war bei dieser Meßanordnung auf drei Punkte beschränkt (rechtes / linkes Kiefergelenk, Inzisalpunkt).

Zwei Jahre später (1973) untersuchte HENERS (4) auch mit elektronischen Drehbewegungsgebern die sagittale, zweidimensionale Genzbewegung des Unterkiefers. Er verwandte auch eine Trägerfrequenzmeßbrücke als Signalverstärker. Da sich HENERS auf die Registrierung der sagittalen Komponente der Unterkieferbewegung beschränkte, kam er mit nur einem am sog. vorderen Dreieck, d.h. am Inzisalpunkt, befestigten Tastzeiger aus. Ebenso wie KÖRBER befestigte er die Apparatur mit Hilfe einer paraokklusären Schiene an der Oberkieferzahnreihe. Er verzichtete zuerst auf eine Aufzeichnung der Bewegung auf einem XY-Schreiber und beschränkte sich auf die Darstellung mit Hilfe eines Oszilloskops. Zur Kalibrierung wurde eine spezielle Eichvorrichtung entwickelt, mit der der Nachweis einer verzerrungsfreien, fehlerlosen Registrierung erbracht wurde. Der Autor wies die Reproduzierbarkeit der Grenzbewegung in Übereinstimmung mit dem Posselt-Diagramm nach. Über das Auflösungsvermögen der Meßapparatur wurden keine Angaben gemacht. Eine Aussage über die räumliche Bewegung des Inzisalpunktes ließ diese Meßmethode nicht zu.

Das erste berührungslos arbeitende Registriersystem stellten JANKELSON et al (5) 1975 vor. Der große Vorteil des als Kinesiograph bezeichneten Gerätes bestand in dem Konstruktionsprinzip, weil der Unterkiefer durch keinerlei Meßge-

gestänge mechanisch mit der Registriervorrichtung in Verbindung stand.
Das elektromechanische Gerät bestand aus:
- Permanentmagnet an der Unterkieferfront (2,8 g schwer)
- Sensorensystem an einem Brillengestell (ca. 135 g schwer) mit 6 Magnetometern (davon 1 zur Kompensation des Erdmagnetfeldes und 5 zur dreidimensionalen Registrierung der Unterkieferbewegung)
- Computer zur Kompensation der Feldstärkenänderung
- Zweistrahloszilloskop zur Darstellung der Bewegungsbahnen

Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgte durch Abfotografieren des Oszilloskopschirmes.
Die Aufzeichnungen erwiesen sich bei Magnetfeldänderungen in der unmittelbaren Umgebung als sehr störanfällig. Projektionen der räumlichen Bewegung der Kondylen waren mit dem Kinesiograph nicht möglich.

1980 überprüfte JANKELSON (23) die Genauigkeit seines Gerätes mit Hilfe einer Meßmaschine und eines Tischrechners. Hierbei ergab sich ein max. Fehler des Kinesiographen von 0,5 mm (=1,5%).

GERNET (24) hat im Jahre 1982 umfangreiche Untersuchungen über die Aussagekraft einer Funktionsanalyse mit dem Kinesiographen in Verbindung mit dem Myo-Monitor vorgenommen.

GOODSON und JOHANNSEN (6) entwickelten ebenfalls 1975 eine Registriervorrichtung, bestehend aus einem sehr aufwendigen Hebelgestänge mit Drehwinkelgebern und Wegaufnehmern. Auch hier dienten paraokklusäre Schienen der Fixierung der Mechanik am Unterkiefer. Entscheidend für das Gelingen der Registrierung war eine möglichst feste Fixierung des Probandenschädels mittels Kopfgips. In dieser Untersuchung wurden die räumlichen Unterkieferbewegungsbahnen erstmals mit Hilfe eines Rechners mathematisch bestimmt. Da man die allgemeine Unterkieferbewegung ermittelte, konnten somit auch beliebige, frei wählbare Unterkieferpunkte (z.B.

Inzisalpunkt, verschiedene Zähne) zur Projektion herangezogen werden. Die Koordinaten dieser Projektionspunkte wurden röntgenographisch bestimmt. Die Autoren untersuchten die Öffnungs- und Schließbewegungen, die Lateralbewegungen, die Protrusion und die Kauzyklen. Die Aufzeichnung der Kondylenbahnen war nicht vorgesehen.

LEMMER, LEWIN und VAN RENDSBURG (7) registrierten 1976 die räumlichen Bewegungsbahnen des Inzisalpunktes.
Sensoren, die an einem Brillengestell befestigt waren, erfaßten Magnetfeldänderungen (Hall-Effekt), die durch einen an der Unterkiefer-Front angeklebten kleinen Stabmagneten während der Unterkieferbewegung hervorgerufen wurden. Die untersuchten Bewegungsbahnen (Grenz- und Kaubewegungen) wurden auf einem XY-Schreiber ausgeschrieben. Angaben über die Genauigkeit des Gerätes fehlen.
(Vgl. das System SIROGNATHOGRAPH der Fa. SIEMENS AG)

1977 modifizierte HENERS (8) seine Apparatur dahingehend, daß durch Hinzufügen weiterer Drehbewegungsgeber nun auch dreidimensionale Bewegungsregistrierungen vorgenommen werden konnten. Auch ließ er nun die Bewegungskurven durch einen XY-Schreiber auszeichnen.
Er wiederholte das Untersuchungsprogramm von 1972.

MACHENS und HENERS (9) gaben 1979 mit Hilfe des oben beschriebenen, modifizierten Gerätes die biologische Toleranz der vier Unterkieferbewegungen an. Die Mittelwerte der dreidimensionalen Grenzpositionen wurden an Hand von 10 Probanden statistisch ermittelt.
Diese Untersuchung über die physiologische Ungenauigkeit des Kauapparates verdeutlicht die Problematik der Reproduzierbarkeit von Unterkieferbewegungen, insbesondere der Scharnierachsenlokalisation.

Eine weitere Variante eines analogen Meßverfahrens stellten 1977 WAYSENSON und SALOMON (10) vor. Mit Hilfe einer in

den drei Ebenen des Raumes orthogonal ausgerichteten optoelektronischen Registriervorrichtung wurden besonders die Unterkieferbewegungen während des Kauens, Schluckens und v.a. des Sprechens untersucht. Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in der idealen Methodik, den Bewegungsablauf absolut störungsfrei und berührungslos zu erfassen. Diese technisch sehr anspruchsvolle Problemstellung konnten die beiden Autoren erstmals lösen. Leider ließ die Meßanordnung keine genauere Analyse der Unterkieferbewegungsbahnen zu. Auch hier wurden die Bewegungen nicht mathematisch erfaßt und relativiert. Besonders nachteilig wirkten sich Kopfbewegungen der Probanten während der Registrierung aus.
Die Autoren beschränkten sich deshalb mehr auf das Studium der grundlegenden, allgemeinen Bewegungsabläufe.

In einer weiteren Untersuchung zeigten 1979 WAYSENSON und SALOMON (11) ein System auf, das alle oben genannten Nachteile nicht beinhaltet. Es gelang ihnen der bis dahin anspruchvollste Beitrag zur mathematischen Analyse der Kieferbewegungen. Die sehr aufwendige Methode arbeitete ebenfalls berührungslos. Eine am Kinn (bzw. Inzisalpunkt) der Testperson befestigte radioaktive Substanz (Radionuklid) wurde während ihres räumlichen Bewegungsverlaufes durch eine Gamma-Kamera verfolgt. Die Digitalisierung der analogen Werte, die die zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Kameras abgaben (X-,Y-,Z-Koordinaten) erfolgte durch einen Analog/Digital-Wandler. Als Speichermedium für die massenhaft anfallenden Meßwerte diente ein Plattenspeicher. Projektion und mathematische Manipulation übernahm ein Minicomputer mit angeschlossenem Bildschirm. Die etwas komplizierte Eichung sowie die Streuung der radioaktiven Strahlung begrenzten die Auflösung des Systems vorerst auf 1 mm.
Die Autoren arbeiten an einer verbesserten Eichmethode, die die Auflösung weiter steigern soll.

Mitte der 70er Jahre beschäftigten sich vornehmlich amerikanische Autoren mit der Verarbeitung der Registrierdaten mit Hilfe von Computern. Wie sich aus den bisher aufgeführten Methoden ersehen läßt, wurden die analogen Meßwerte meist nicht weiter verarbeitet. Ein Grund hierfür liegt in der problematischen Überführung (Digitalisierung) des Meßwertes in eine durch den Computer verwertbare, digitale Form.

1976 stellten McCOY, SHRYOCK und LUNDEEN (12) eine Methode vor, die diese Digitalisierung sehr vereinfachte. Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens war das Vorhandensein eines Kunststoffblock-Registrats nach der LEE-Turbinenfrästechnik (32).
Von den zwei individuell gefrästen, gravierten Patienten-Registratblöcken wurden von drei Seiten (X,Y,Z-Richtung) normierte Fotoaufnahmen angefertigt und anschließend auf Millimeterpapier abgepaust. Diese Zeichnungen konnten dann mit Hilfe eines Digitizers in einen Rechner eingegeben werden. Dadurch war es möglich, diese Daten durch EDV weiter zu verarbeiten. Dieses Verfahren erwies sich in Verbindung mit dem LEE-Systems als recht brauchbar.

Ein weiterer Beitrag stammt von KARLSSON (13). Er beschreibt ein opto-elektronisches, ebenfalls berührungsloses Verfahren (Selspot-System) zur dreidimensionalen Registrierung des Kauzyklus am Inzisalpunkt.
Hierbei wurde eine Leuchtdiode (LED) auf der labialen Schneidezahnfläche befestigt und deren Leuchtspur während des Bewegungsablaufes von zwei Spezial-Fernsehkameras aufgezeichnet.
Es handelte sich hierbei um eine Pilotstudie, bei der keine genaueren Untersuchungen am Patienten vorgenommen wurden.

Mittels dieser Methode untersuchten LUNDEEN, SHRYOCK und GIBBS (14) 1978 sehr umfassend und ausführlich die Unterkiefergrenzbewegungen. An Hand von 163 Patienten-Kunststoff

Registraten erfolgte mittels eines Computerprogrammes die Einteilung der Bewegungsabläufe in standardisierte Gruppen. Es wurden Bewegungsmuster in allen drei Ebenen des Raumes untersucht.

Eine etwas andere Zielsetzung hatten ROEDEMA et al (15). Ihre ebenfalls 1978 veröffentlichte Arbeit beschreibt eine sehr beeindruckende Methode der dreidimensionalen Darstellung der Unterkieferbewegungen zu Studiums- und Lehrzwecken. Grundlage des mathematischen Simulationsprogrammes bildeten die mechanischen Bewegungsspielräume eines DENAR D5A Artikulators. Das dreidimensionale mathematische Modell wurde in einen Minicomputer eingespeichert. Bis zu 25 Einstellungsparameter wie Interkondylarabstand, Gelenkbahnverlauf, Bennettbewegung und -Winkel, etc. konnten beliebig eingegeben und variiert werden. Im Dialog-Betrieb mit dem Computer (Menütechnik) entschieden die Anwender (z.B. Studenten), was ihnen auf dem hochauflösenden Grafikbildschirm angezeigt werden sollte. Es existierten keinerlei Beschränkungen bezüglich der Darstellungsart.
Sowohl die räumlichen Bewegungen der beiden OK- und UK-Zahnkränze, als auch die Bewegungen einzelner Zähne (sogar Höckerspitzen), konnten orthogonal dargestellt werden. Durch Programmänderung ließ sich die Leistung des Systems leicht modifizieren und besonderen Anforderungen anpassen.

1979 modifizierten JEMT und KARLSSON (16), die von KARLSSON (13) angegebene opto-elektronische Registriervorrichtung (Selspot-System) dahingehend, daß die Meßergebnisse durch computergestützte Kompensation von störenden Kopfbewegungen des Probanden unabhänig wurden. Dies erreichten die Autoren durch ein Verfahren, bei dem weitere LED's, die an einem Brillengestell montiert waren, als Referenz für die relative Unterkieferbewegung dienten. Mathematische Manipulationen erlaubten anhand der so gewonnenen Referenzwerte eine genaue Ermittlung der gesuchten, geometrisch bereinigten, relativen, räumlichen Kieferbewegungsbahn.

Auch hier erfolgte die Digitalisierung noch von Hand, was wieder statistische Ausgleichsrechnungen erforderlich machte. Die Auswertung geschah durch einen Computer, der einen Ausdruck mit einer Auflösung von 0,2 mm erstellte. Aussagen Über den Verlauf von Kiefergelenksbahnen, Posselt-Diagramm, Scharnierachsenlokalisation etc. wurden nicht gemacht. Die Studie beschränkte sich auf die dynamische und metrische Untersuchung der Kauzyklen bei verschiedenartiger Kost, sowie die Öffnungs- und Schließphase bei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten.

GIBBS, LUNDEEN und MAHAN (17) verwandten 1981 bei ihren umfangreichen Untersuchungen über die Beziehung zwischen Kaubewegungen und Grenzbewegungen einen Gesichtsbogen mit elektromagnetischen Sensoren. Es wurde ausschließlich der 1.Molar in seiner räumlichen Bewegung erfaßt und dargestellt.
Die Genauigkeit der rechnergestützten Anlage betrug max. 0,13 mm bei einer Erfassungsfrequenz von 100 Punkten/Sek.

Zu Beginn der 80er Jahre stellte die Fa. SIEMENS ein kompaktes Registriersystem vor, das für den Routinegebrauch bei der Funktionsanalyse vorgesehen war (18).
Ähnlich der Anordnung von LEMMER, LEWIN und VAN RENDSBURG (7) wurden die räumlichen Bewegungen des Unterkieferinzisalpunktes durch ein elektromagnetisches, auf dem Hall-Effekt basierendes, Aufzeichnungssystem analog erfaßt und in orthogonaler Projektion dargestellt.
Die Systemkomponenten des 'Sirognathograph' sind:
- 1 cm langer Stabmagnet
- Kopfgestell mit jeweils 4 Hall-Detektoren auf beiden Seiten des Gesichtsschädels
- Elektronik mit Speicheroszilloskop zur Darstellung.

Die Nachteile dieses Systems waren die noch nicht ganz kompensierte Störanfälligkeit gegenüber Magnetfeldänderungen in der unmittelbaren Umgebung, sowie die Tat-

sache, daß die Kondylenbewegung nicht dargestellt werden konnte. Aufgrund der zeitlich kritischen Meßwerterfassung und -aufbereitung wurden nur relativ langsame Unterkieferbewegungen verzeichnungsfrei dargestellt.

HOFMANN und PRÖSCHEL veröffentlichten 1982 eine klinische Untersuchung, in der der Sirognathograph erstmals angewandt wurde (18).

OHLROGGE (19) beschrieb 1982 in seinem Beitrag ein weiteres Registriersystem, das auch auf einem elektromagnetischen Sensorensystem basierte. Durch die Anordnung der an einem Gesichtsbogen montierten Magnetfeldsensoren in Gelenknähe war allerdings die Darstellung der Kondylenbewegung unter bestimmten Umständen möglich. Klinische Untersuchungen am Patienten wurden noch nicht veröffentlicht.

Ein weiteres Registriersystem für die "elektronische Pantographie" stellte KLETT einige Monate später vor (20).
Das System basiert auf einem von ihm entwickelten, elektronischen Meß- und Anzeigegerät ('String-LR-Recorder' der Fa. Dentron GmbH), sowie Teilen des Stuart-Recorders. Die Wegaufnehmer, die an einem herkömmlichen Stuart-Gesichtsbogen montiert werden, arbeiten berührungslos mit infrarotempfindlichen Empfängern. Dieses optoelektronische Meßverfahren schaltet zwar jegliche Reibungskräfte zwischen den an Ober- und Unterkiefer befestigten Registriervorrichtungen aus, weist aber eine nicht unerhebliche Störanfälligkeit gegen Raumbeleuchtungen mit Infrarotlichtanteil auf. Trotz seiner speziellen Störlichtkompensationsschaltung müssen Sonnen- und Glühlampenlicht auf jeden Fall vermieden werden. Ein Anzeigeverstärker ermöglicht die Direktanzeige von Sideshift, Bennettwinkel und Kondylenbahnneigung.
Da auch hier die räumliche Bewegung des Unterkieferkörpers mathematisch nicht erfaßt wird, ergeben sich die gewohnten Projektionsfehler der pantographischen Bewegungsaufzeich-

nung außerhalb des Kondylen. Weiterhin können nur die Kondylen in ihrer Bewegung registriert werden. Nach Angaben des Verfassers werden Meßfehler während der Mediotrusionsbewegung durch eine elektronische Schaltung automatisch korrigiert. Das Auflösungsvermögen der Anordnung wird mit 10 µm angegeben. Zur Ausrichtung der würfelförmigen Meßköpfe ist eine vorherige terminale Scharnierachsenlokalisation mit einem gebräuchlichen Scharnierachsenlokalisator erforderlich. Gravierender Nachteil des Systems ist die Tatsache, daß mit einem String-LR-Recorder die Bewegung von jeweils nur einem Kiefergelenk aufzuzeichnen ist. Die gleichzeitige Registrierung beider Kondylenbewegungen macht den Einsatz von zwei LR-Recordern erforderlich. Die Möglichkeit, Meßdaten mit Hilfe mikroprozessorgesteuerter Meßwerterfassungssysteme auf Computer zur Auswertung und Speicherung zu überspielen, ist vorgesehen.

In den letzten 2 Jahren wurden eine Vielzahl von ähnlichen, "elektronischen Pantographen" vorgestellt (38,39,40).
Nur wenige sind über das Experimentalstadium hinaus weiterentwickelt worden. Derzeit sind nur vier Systeme im Dentalhandel erhältlich: Kinesiograph (5,23,24)
String-LR-Recorder (Fa. Dentron/BRD)(20)
Pantronic (Fa. Denar/USA) (38)
Cyberhoby F3 System (Fa. Teledyne/USA)

Die Problematik der Projektionsfehler bei der Verwendung von Scharnierachsschreibern zur Registrierung der Kondylenbahn und der Mediotrusionsbewegung ergibt sich, wie schon in der Einleitung erwähnt, auf Grund der Tatsache, daß Meßort und Ort des zu vermessenden Gelenkes nicht identisch sind.

KLETT (21) hat hierzu 1982 eine theoretische Modellrechnung über die Projektionsfehler bei der Messung des Bennett-Winkels aufgestellt. Er kam zu dem Ergebnis, daß der gemes-

sene Bennettwinkel meist kleiner ist als der tatsächliche Winkel am Ort des Gelenkes. Es können sich Fehler bis über 10 Grad ergeben. Dieser Fehler ist hauptsächlich abhängig vom Ausmaß der initialen Translation während der Mediotrusionsbewegung (immediate side shift) und vom Abstand der Meßstelle zum zu vermessenden Gelenk.

Über die resultierenden okklusalen Differenzen bei Verwendung einer fehlregistrierten Scharnierachse promovierte SÖRGEL 1978 (22). Auch er wies in einer theoretischen Modellrechnung auf die damit verbundenen Verprojektionen bei der Mediotrusionsbewegung hin.

Nicht zuletzt seien an dieser Stelle auch die Untersuchungen Über die Interpretation der räumlichen Verprojektion der Kondylenbewegung von KRÜGER, KUBEIN und STACHNISS (33,34) erwähnt.

4. Beschreibung des Systems

Die bisher üblichen, bereits erwähnten genauen Registriermethoden sind einerseits zeitlich sehr aufwendig und bedürfen anderseits relativ großer mechanischer Vorrichtungen, deren Gewicht sich als eine nachteilige Komponente erweist. Außerdem ist es bei derartigen Registrierverfahren nicht möglich, die Bewegungen exakt im Rotationszentrum graphisch darzustellen. Die Aufzeichnungen erfolgen grundsätzlich auf einer dem Rotationszentrum mehr oder weniger weit entfernten Schreibplatte.
Diese bisher ungelösten Probleme veranlaßten mich zu dem Versuch, eine Registriervorrichtung zu konzipieren, der folgende Prinzipien zu Grunde liegen:

1. Der räumliche Bewegungsverlauf des gesamten Unterkiefers wird während der Registrierung mathematisch erfaßt.

2. Die Unterkieferbewegung wird auf den fixen Oberkiefer und damit auch auf den Schädel bezogen und in einem räumlichen Koordinatensystem dargestellt (siehe Abb.12).
Der Ursprungspunkt O dieses Koordinatensystems liegt im Zentrum des Oberteils der Meßmechanik und ist deshalb von den individuellen Schädelverhältnissen völlig unabhänig. Der Oberkiefer (Patient) befindet sich in negativer Y-Richtung. Die X-Achse zeigt vom Probanden aus betrachtet nach links, die Z-Achse nach caudal.

3. Die letztendliche Projektion der Bewegung einzelner, beliebig auswählbarer Punkte erfolgt durch Koordinatentransformation. Die XYZ-Koordinatentripel der drei Punkte, die die Unterkieferebene aufspannen, bilden die Grundlage aller weiteren Berechnungen.
Dieses mathematische Modell hat Allgemeingültigkeit für die Stellung bzw. Lage zweier Ebenen (hier OK - UK) zueinander und berücksichtigt somit alle denkbaren Stellungen von typischen und atypischen Bewegungen.

Diese Allgemeingültigkeit war Vorraussetzung für eine geometrisch fehlerfreie Adaption an zahnmedizinisch relevante Anforderungen. Die grundlegenden mathematischen Hauptformeln für die Berechnung der Koordinatentripel des rechten, linken und vorderen Punktes der Unterkieferebene werden unter 4.8. näher beschrieben.
Ausgangsparameter der mathematischen Erfassung der Bewegung sind 7 Winkel, die über Drehwinkelgeber (Potentiometer) gemessen werden. Die Meßwertverarbeitung geschieht wie folgt:

Unterkieferbewegung
I
Übertragung auf die Meßmechanik
I
Winkeländerung
I
Widerstandsänderung in den Potentiometern
I
Spannungsänderung (0 bis 10 V)
I
Erfassung der 7 analogen Spannungswerte durch die AIS
(Analog Input Section des Meßwerterfassungssystems)
I
Digitalisierung der Signale
I
Transfer zum Rechner
I
Abspeicherung der Werte
I
Mathematische Berechnung der Bewegung
I
Abspeicherung der Koordinatentripel
I
Weiterverarbeitung und Manipulationen
I
Ausgabe und Abspeicherung der Ergebnisse

Als praktischer Teil in dieser Arbeit sollen in einem Versuch die Möglichkeiten einer solchen elektronischen, computergestützten Unterkieferbewegungsregistrierung getestet werden. An ein solches System werden folgende Forderungen gestellt:

1. Alle Nachteile, die bisher die Registrierung mit Pantographen mit sich brachte, auszuschalten
2. Eignung zum Routinebetrieb (in der zahnärztlichen Praxis)
3. Hinreichend hohe Meßgenauigkeit im Micrometerbereich
4. Einfache Handhabung und hohe Zuverlässigkeit
5. Uneingeschränkte Erfassung aller Unterkieferpunkte
6. Bestimmung der Scharnierachsenlokalisation bzw. der beiden kinetischen Drehzentren der Kondylen

Das dazu entwickelte System besteht aus:

1. Elektronische Bewegungsmeßmechanik mit 7 Drehwinkelgebern (Potentiometern)

2. Befestigungsträger (paraokklusäre Schienen)

3. Koordinatenbestimmungsmechanik

4. Schnittstellen-Schaltung mit Meßwerterfasser, AD-Wandler Instrumentenverstärker und Spannungsversorgung

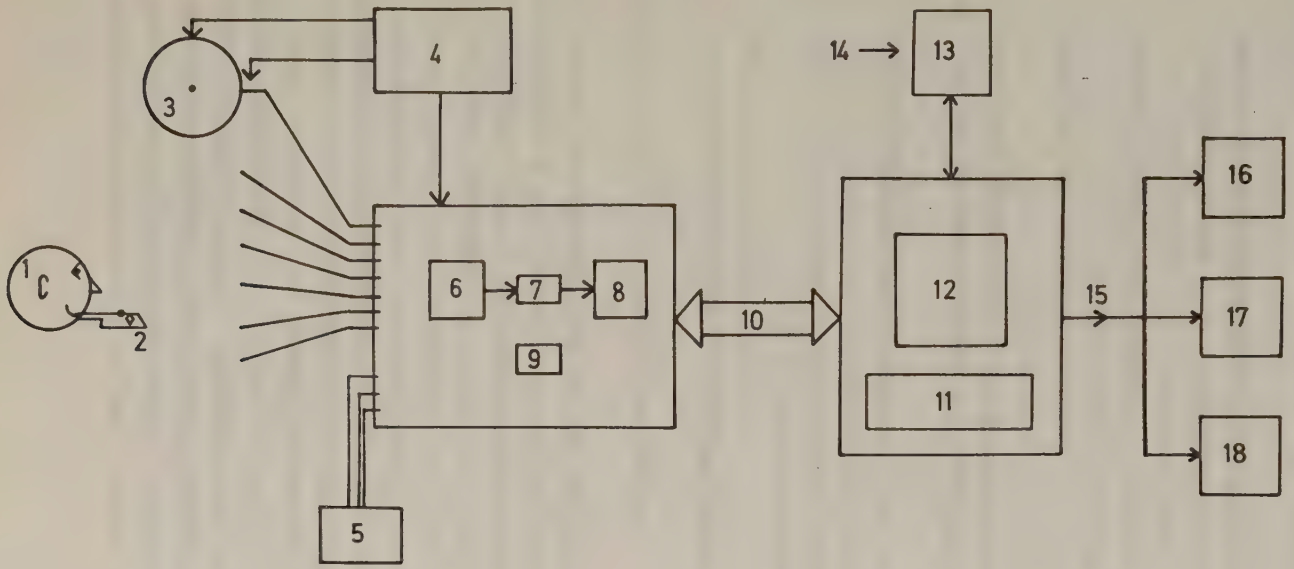
5. Computer mit Grafik-Bildschirm

6. Peripherie-Geräte: Drucker, XY-Plotter, Grafikmonitor

7. Computerprogramm (in Programmiersprache 'Basic' mit Maschinensprache-Unterroutinen im 6502 Assembler-Code)

Abb. 1 zeigt in einem Blockschaltbild die einzelnen Komponenten des Systems, die nun genauer beschrieben werden.

MESSWERTGEBER MESSWERTERFASSUNGSSYSTEM COMPUTER PERIPHERIGERÄTE



1 = PROBAND
2 = BEWEGUNGSMESSMECHANIK
3 = DREHWINKELGEBER
4 = SPANNUNGSVERSORGUNG
5 = KOORDINATEN BEST. MECH.
6 = KANALMULTIPLEXER
7 = MESSWERTVERSTÄRKER
8 = A/D - WANDLER
9 = KONTROLLOGIK
10 = DATENTRANSFER BUS
11 = TASTATUR
12 = GRAFIKBILDSCHIRM
13 = MASSENSPEICHER
14 = PROGRAMM
15 = PERIPHERIEINTERFACE
16 = GRAFIKDRUCKER
17 = XY - PLOTTER
18 = KOPIERFRÄSE

ABB. 1 BLOCKSCHALTBILD DES ECRS

4.1. Bewegungsmeßmechanik

Die Bewegungsmeßmechanik ist zweiteilig. Das obere Teil ist über einen Befestigungsträger mit dem Oberkiefer direkt verbunden und trägt sieben Präzisions-Drehpotentiometer (z.B. NOVOTECHNIK DINOPOT P2500). Das untere Teil ist mit dem Unterkiefer fest und an drei äquidistanten Punkten, durch Miniatur-Kunststoff-Kardangelenke beweglich, mit dem oberen Teil der Apparatur verbunden. Oberteil und Unterteil, sowie alle Verbindungsstücke sind aus Aluminium und jeweils aus einem Stück gefertigt (Abb.2,3,4,5).
Das Gewicht der kompletten Meßmechanik beträgt ohne die Befestigungsträger ca. 250g. Die toleranzbestimmenden Teile der Mechanik sind die Drehpotentiometer, die als Scharniergelenke fungieren. Ihr Axial- und Radialspiel beträgt weniger als 50 µm. Es wurden ausgesuchte Exemplare mit eingeengtem Spiel verwendet.

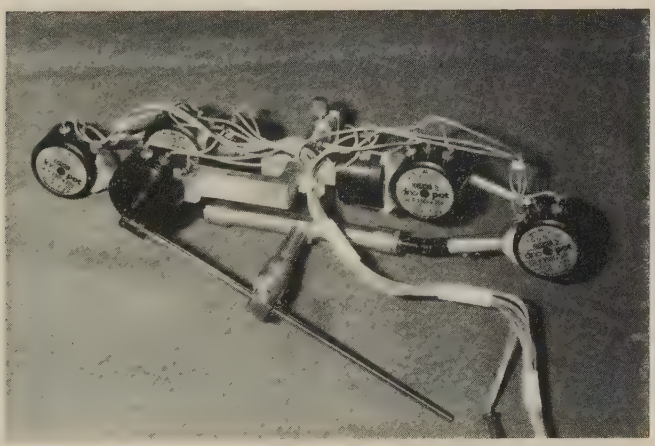


Abb.2 : Bewegungsmeßmechanik

Das besondere an der Konstruktion ist die Tatsache, daß wir dank der exakt fluchtenden Präzisionslagerung und der ausgezeichneten mechanischen Toleranzen der Drehpotentiometer, eine selbsttragende Konstruktion verwirklichen konnten. Die Potentiometer sind somit zugleich Präzisions-Drehwinkelgeber und Präzisions-Scharnier. Dieser Vorteil vereinfachte das Konstruktionsprinzip entscheidend. Durch die sehr niedrigen Kontaktkräfte der Mechanik während der Bewegung (Drehmoment pro Potentiometer < 0,07 Ncm) wird ein nahezu rückwirkungsfreies Messen ermöglicht.
Weitere technische Daten der in HQ5-Technologie hergestellten Leitplastik-Potentiometer DINOPOT P2500 sind folgende:

- Durchmesser: 27 mm - Nutzwinkel: 345 Grad
- Nennwiderstand: 2KOhm - Auflösung < 0,003% (= 0,01 Grad)
- eingeengte und unabhänige Linearität von 0,05%
- Glätte: 0,025%
- elastomer-gedämpfte Schleifer
- unipolare Speisespannung von + 10 Volt

Abb.3 : Bewegungsmeßmechanik in situ (laterale Ansicht)

Abb.4 : Bewegungsmeßmechanik in situ (frontale Ansicht)

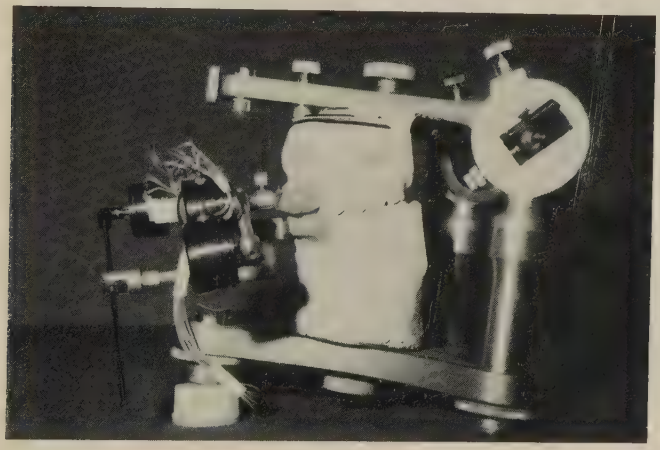


Abb.5 : Bewegungsmeßmechanik am Artikulator (seitl. Ansicht)

4.2. Befestigungsträger

Die Befestigung der Mechanik am Ober- und Unterkiefer erfolgt über einfache U-förmige Kunststoff- oder Aluminiumträger, die mit Autopolymerisat an den individuell verlaufenden jeweiligen Zahnkranz so angegossen werden, daß weder Okklusion noch Artikulation gestört sind. Die Schienen werden, nachdem sie auf dem Arbeitsmodell paßgenau beschliffen wurden, mit einem physiologisch verträglichen Cyano-Acrylat-Kleber (z.b. TECHNICOLL 8201 der Fa. BDF Beiersdorf/Hamburg) vorrübergehend angeklebt. Bei teilbezahntem oder zahnlosem Gebiß verwendet man einen modifizierten Funktionslöffel. Durch diese Befestigungsarten müssen keine Bißsperrung oder andere hinderliche Einschränkungen in Bezug auf Okklusion und Artikulation in Kauf genommen werden.
Sicherlich werden sich im weiteren Verlauf der klinischen Versuche des Systems noch weitere Befestigungsalternativen ergeben.

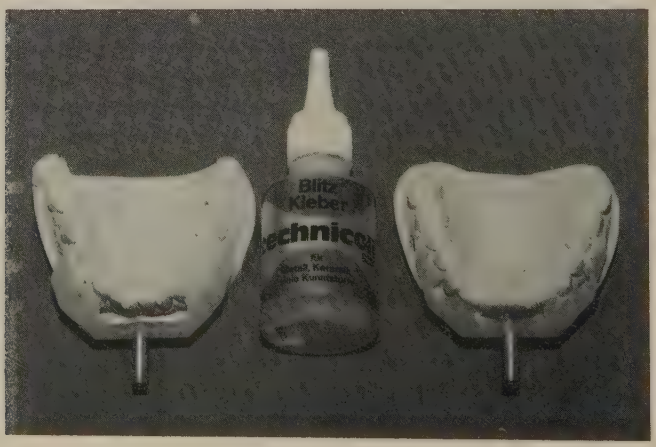


Abb.6 : Befestigungsträger auf dem Modell hergestellt (einzukleben mit TECHNICOLL 8201)

4.3. Koordinatenbestimmungsmechanik

Sie dient der räumlichen Bestimmung der Ortskoordinaten von Schädelpunkten (Infraorbitalpunkt) und den zu projizierenden Punkten am Unterkiefer (Abb.8)
Prinzipiell ähnelt die einteilige, aus drei Drehpotentiometern und Verbindungselementen bestehende Meßmechanik der bereits beschriebenen Bewegungsmeßmechanik. Auch hier übernehmen die drei senkrecht zueinander angeordneten Drehpotentiometer zugleich tragende Funktion. Nach vorheriger Montage des Unterkiefer-Befestigungsträgers (paraokklusäre Schiene) am Unterkiefermodell läßt sich die Mechanik auf dem Träger mittels der Arretierungsschrauben fixieren. Die Ausrichtung der Mechanik entspricht der der Bewegungsmeßmechanik.
Aufgrund der Anordnung der drei Drehpotentiometer und der stylusförmigen Zeigespitze läßt sich jeder Punkt der Unterkieferzahnreihe abgreifen (Abb.7).

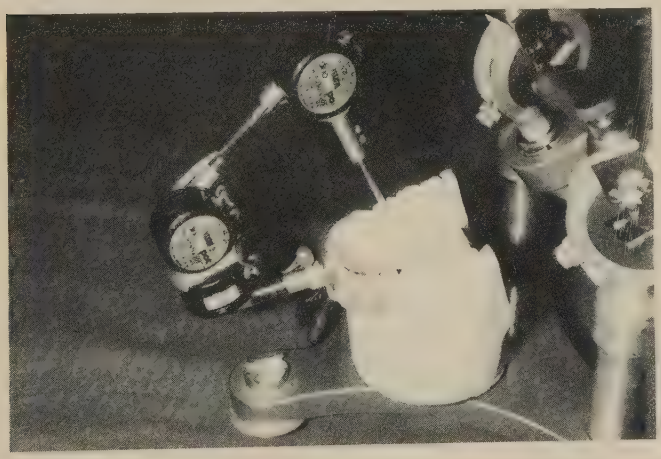
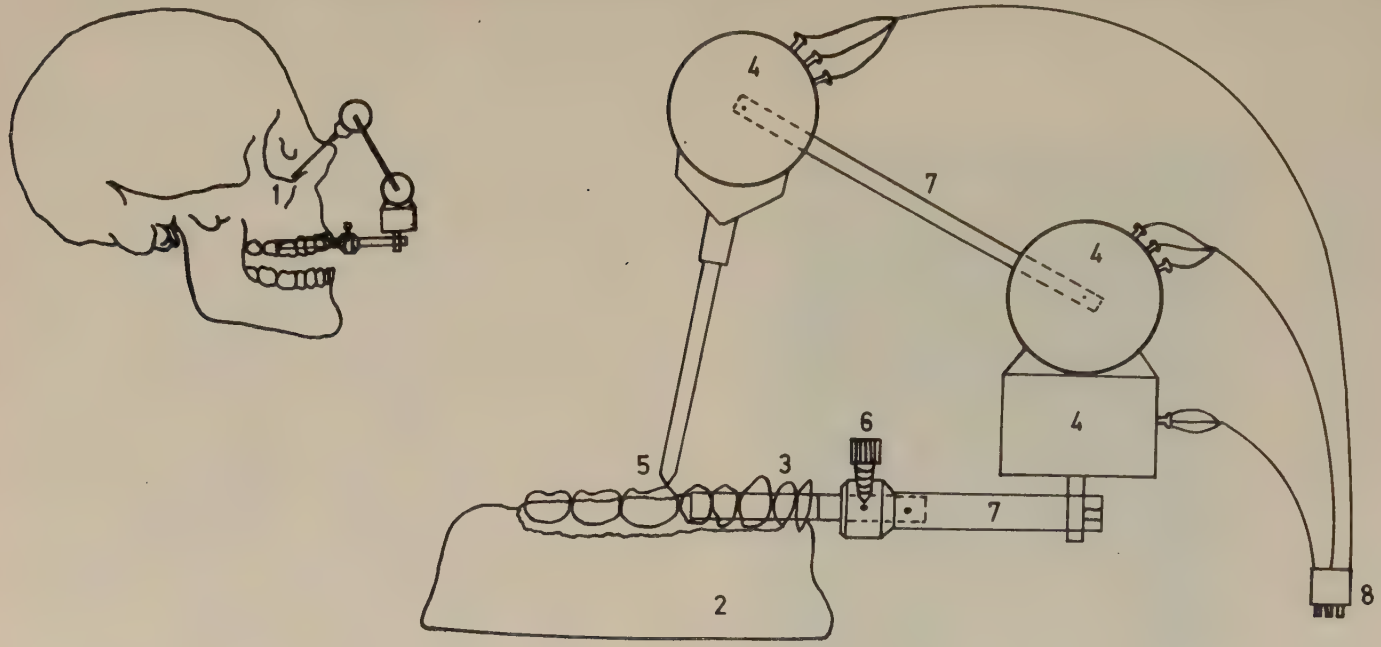


Abb.7 : Koordinatenbestimmungsmechanik (auf Zahn 46)



1 = INFRAORBITALPUNKT
2 = UNTERKIEFERMODELL
3 = BEFESTIGUNGSTRÄGER
4 = DREHWINKELGEBER
5 = STYLUS
6 = ARRETIERUNGSSCHRAUBE
7 = VERBINDUNGSELEMENTE
8 = KABEL ZUM MESSWERT-ERFASSUNGSSYSTEM

Abb. 8 : KOORDINATENBESTIMMUNGSMECHANIK

Nach genauer Plazierung der Spitze auf dem zu bestimmenden Punkt werden die Potentiometerstellungen auf Tastendruck vom Rechner eingelesen und in Raumkoordinaten umgerechnet. Diese beziehen sich auf das Zentrum des Mechanikunterteils und geben somit die Position bezüglich der Ebene des Mechanikunterteils an. Je nach Programmkonfiguration können auch mehrere Projektionspunkte hintereinander bestimmt und abgespeichert werden (z.B. Höckerspitzen mehrerer Zähne).
Eine weitere Anwendung der Mechanik besteht in der genauen Bestimmung der Raumkoordinaten des Infraorbitalpunktes. Diese erfolgt bereits vor der eigentlichen Unterkieferbewegungsregistrierung derart, daß man nach der paraokklusalen Fixierung des Befestigungsträgers am Oberkiefer die Mechanik aufsteckt und die Zeigespitze an den Weichteilpunkt des unteren Orbitarandes aufsetzt. Dann werden die Koordinaten des Infraorbitalpunktes auf Tastendruck ermittelt und abgespeichert. Bei Bedarf kann eine beidseitige Bestimmung (rechter und linker Infraorbitalpunkt) erfolgen.

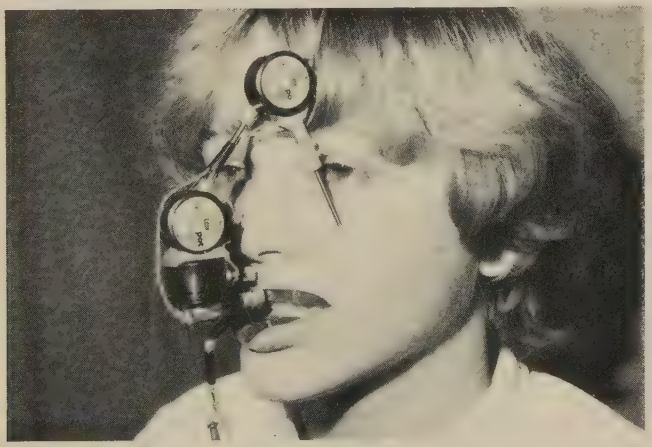


Abb.9 : Koordinatenbestimmungsmechanik (Infraorbitalpunkt)

4.4. Schnittstellenschaltung
(Meßwerterfassungssystem)

Die 7 Potentiometer messen 7 Winkel, durch die die Lage des Unterkiefers zum Oberkiefer während der Bewegungsregistrierung mathematisch festgelegt wird. Die Spannungsversorung der Potentiometer erfolgt durch eine programmierbare Präzisionsstrom- und Spannungsquelle (z.b. ANALOG DEVICES 2B35JE). Diese Komponente weist eine sehr niedrige Drift (< 0,05%/Grad C), eine Netzregelung von weniger als 0,08% und eine Lastregelung von maximal 0,1% auf. Zu dem auf + 10 V programmierten Referenzausgang (125 mA) liefert der Modul auch $\pm$ 15 V (bei 65 mA) zur Spannungsversorgung der weiteren elektronischen Komponenten.
Die 7 einzelnen Widerstandswerte (= Winkel) werden durch ein integriertes 16-Kanal, 12-Bit auflösendes, zweiteiliges Meßwerterfassungssystem (z.B. ANALOG DEVICES AD363K) innerhalb von 395 µsec abgefragt, an den Rechner übergeben und im Arbeitsspeicher abgelegt. Der Datentransfer zum Rechner erfolgt über einen bidirektionellen 8-Bit Daten-Bus. Die Abfragerate läßt sich per Programm in einem Frequenzbereich von 10 bis 60 Hz wählen (43).
Das Herzstück der Schnittstelle (Interface) besteht aus zwei getrennten Funktionsblöcken (AIS- und ADC-Section) und ist in modernster Dick- und Dünnfilm Hybrid-Technologie mit aktiver Lasertrimmung hergestellt. Der darin enthaltete 12-Bit A/D-Wandler arbeitet nach dem Prinzip der 'sukzessiven Approximation' und benötigt für eine komplette 12-Bit Wandlung weniger als 25 µsec. Diese kurze Wandlungszeit ist für eine verzeichnungsfreie Erfassung der sequentiell eingehenden, zu digitalisierenden Spannungswerte (0 bis 10V) unbedingt erforderlich.
Weitere technische Daten des AD363 sind :
- Volle TTL/DTL Kompatibilität
- Durchsatzrate: 30 KHz
- Linearitätsfehler < 0,012%
- Eigenimpedanz 10'10 Ohm

Da bei keinem der sieben Potentiometer der volle Nutzwinkel von 345 Grad ausgenutzt wird, sondern maximal eine Winkel-

änderung von 180 Grad auftritt, bot sich ein Aufspreizen dieses Bereiches auf den gesamten Spannungsbereich von 0 bis 10 V an. Erreicht werden konnte dies mit Hilfe eines zwischen AIS und ADC geschalteten Instrumenten-Verstärkers (z.B. ANALOG DEVICES AD521C), der eine programmierbare Verstärkung von 0,1 bis 1000-fach ermöglicht. Die maximale Linearitätsabweichung des IC's beträgt weniger als 0,1% bei 40 MHz Bandbreite. Bei Bedarf läßt sich damit eine Auflösungsverbesserung um den Faktor 2 erzielen. Bei 12-Bit Präzision (2'12 = 4096 Unterteilungen) ergibt sich somit im elektronischen Teil des Systems ein Fehler von max. 0,044%. Die weitere Übertragung auf den bidirektionellen 8-Bit Daten-Bus des Rechners erfolgt durch zusätzliche diskrete TTL-Schaltkreise (Datenselektoren / Multiplexer). Als Kontrollogik für das Interface dienen Gatter und Inverter, die ihre Steuerimpulse vom Rechner erhalten. Auch die Adressierung der 7 Potentiometer durch die AIS erfolgt auf Befehl des Rechners über den Daten-Bus.
Bis auf die Verbindungsleitungen zwischen Potentiometer und AIS, die einzeln abgeschirmt sein müssen, handelt es sich bei allen anderen elektrischen Leitungen um unkritische, störungsunempfindliche Verbindungen. Dies ist besonders in der zahnärztlichen Praxis, in der elektrische bzw. elektromagnetische Störungen die Regel sind, von Vorteil.

4.5. Computer

Hier bieten sich eine Vielzahl von Tischrechnermodellen an. Wir wählten einen MINIMAX I der Fa. COMPUTHINK/USA mit 45K-Byte Arbeitsspeicher und 800K-Byte Diskettenlaufwerk. Er arbeitet mit einem der schnellsten und leistungsfähigsten 8-Bit Mikroprozessoren (46) (6502A von Rockwell International Inc./USA). Außerdem stellt der MINIMAX ein gutes, preiswertes, integriertes Kompaktsystem dar, mit eingebautem Grafik-Bildschirm (240 x 512Punkte), Diskettendoppellaufwerk und vielen Interfaceanschlußmöglichkeiten.

Der Rechner wird in der populären Programmiersprache BASIC (45) und interner Maschinensprache (6502-Code)(46) programmiert. Letztere ist für die zeitkritische Meßwerterfassung erforderlich.
Ein neuartiges Programmentwicklungspaket erlaubt darüberhinaus die Verwendung höherstrukturierter, compilierter Programmiersprachen wie BASIC, PLM/X, MLI und FORTH.
Der gesamte Datenverkehr mit der Meßmechanik läuft über den 3 x 8-Bit User Port (8255-Chip), an den sich z.B. auch eine Kopierfräse zur Herstellung von Kunststoffgelenkblockeinsätzen für vollindividuelle Artikulatoren anschließen läßt. Über den ebenfalls implementierten parallelen CENTRONICS-Druckeranschluss und den seriellen RS-232C Port läßt sich eine Palette von Peripheriegeräten wie verschiedene Drucker, XY-Plotter, Digitizer sowie weitere Monitore ansteuern.
Die Anzahl der während einer Registrierung abspeicherbaren Punkte ist durch die Kapazität des Arbeitsspeichers (45KB) auf 450 begrenzt.

Abb.10 : Meßwerterfassungssystem und Computer (MINIMAX I)

4.6. Peripheriegeräte

Als Ausgabeeinheit verwenden wir den schnellen Matrixdrucker ANADEX DP 9501. Aufgrund seiner graphischen Fähigkeiten und des breiten Papierformats (37,5 cm) eignet er sich besonders gut zur Erstellung von Grafikbildschirmausdrucken (Hardcopies). Es können pro Zeile bis zu 220 Zeichen oder 990 Graphikpunkte ausgegeben werden. Die hohe Druckgeschwindigkeit von bis zu 200 Zeichen/Sek. erlaubt ein kaum verzögertes, gleichzeitiges Ausdrucken aller 450 errechneten Wertegruppen während der Bewegungsdarstellung eines Unterkieferpunktes.
Als weitere Peripheriegeräte kommen in Frage:
- XY-Plotter (z.B. HEWLETT PACKARD HP9872)
- zusätzliche Grafikmonitore (auch Farbmonitore)
- digital gesteuerte Kopierfräsen zur Herstellung individuell gefräster Artikulatorgelenkblockeinsätze.

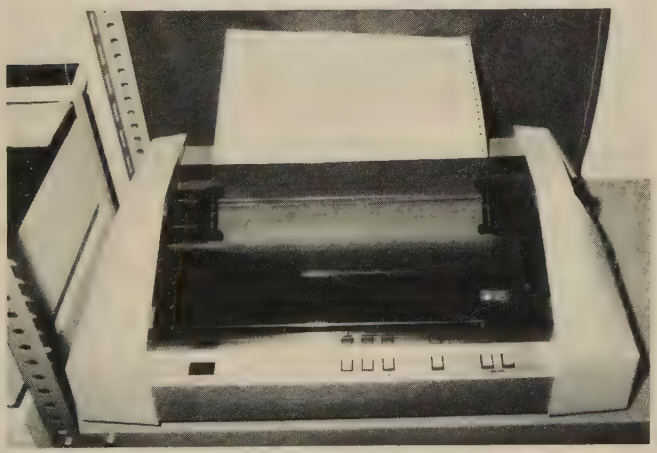


Abb. 11 : Matrixdrucker mit Grafikfähigkeit

4.7. Computerprogramm

Im vorliegenden System übernimmt der Rechner nicht nur die mathematische Bestimmung der räumlichen Unterkieferbewegungen, sondern auch alle Steuer- und Kontrollaufgaben für das Meßwerterfassungssystem, sowie die Speicherung der Daten und die graphische Darstellung der Bewegungsbahnen. Diese Tatsache macht ein sehr komplexes und stark strukturiertes Programm erforderlich. Es belegt ca. 15K-Bytes des Arbeitsspeichers und ist größtenteils in BASIC (45)(Version MICROSOFT, zehnstellige Präzision) geschrieben. Der Dialog mit dem Anwender erfolgt über Menü-Anweisungen. Alle Eingaben des Anwenders werden auf Richtigkeit überprüft. Folgende zahnärztlich relevante Parameter (37) können explizit berechnet werden:

1. Scharnierachslokalisation, d.h. die Lage der beiden Kondylendrehzentren im räumlichen Bezugskoordinatensystem
2. Interkondylarabstand
3. Gelenkbahnneigung (HCN) zur Scharnierachse-Orbital-Ebene
4. Bennett-Winkel
5. Bennett'sche Lateralbewegung und Immediate Side Shift

Da alle 450 Registrierpunkte eines Registrierzyklus abgespeichert sind, können jederzeit die maximalen Längen der Protrusions- und Mediotrusionsbahnen, der Fischer-Winkel sowie die Dynamik (d.h. Geschwindigkeit und Beschleunigung) der einzelnen Bewegungssegmente errechnet werden.
Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, auf alle bedienungstechnischen Einzelheiten und Leistungen des Programms einzugehen. Es sei jedoch noch erwähnt, daß es auch einige in Maschinensprache (6502A Assembler-Code) (46) geschriebene Unterroutinen beinhaltet. Dadurch erreicht man in diesem Fall eine Erhöhung der Meßwerterfassungsfrequenz um Faktor 10. Dennoch benötigt das Programm zur Errechnung einer kompletten Registrierung (450 Punkte) ca. 5 Minuten.

4.8. Mathematik

Dem mathematischen Modell des ECRS liegen Verfahren aus der vektoriellen, analytischen Geometrie zugrunde (44,47,50). Das Oberteil der Bewegungsmeßmechanik spannt durch seine 3 Mechanikachsen das Bezugskoordinatensystem auf. Sein Ursprung liegt genau im Zentrum des Bewegungsmeßmechanikoberteils (Punkt 0). Die drei Eckpunkte des Mechanikunterteils (PL,PR,PV) legen eine Ebene fest, deren räumliche Bewegung während der Registrierung erfaßt wird (Abb.12).

$$\text{Linker Punkt } PL = \begin{matrix} D+2*B*\sin(GL/2)*\sin(GL/2+BL) \\ 2*B*\sin(GL/2)*\cos(GL/2+BL)*\sin(AL) \\ 2*B*\sin(GL/2)*\cos(GL/2+BL)*\cos(AL) \end{matrix}$$

$$\text{Rechter Punkt } PR = \begin{matrix} -D-2*B*\sin(GR/2)*\sin(GR/2+BR) \\ 2*B*\sin(GR/2)*\cos(GR/2+BR)*\sin(AR) \\ 2*B*\sin(GR/2)*\cos(GR/2+BR)*\cos(AR) \end{matrix}$$

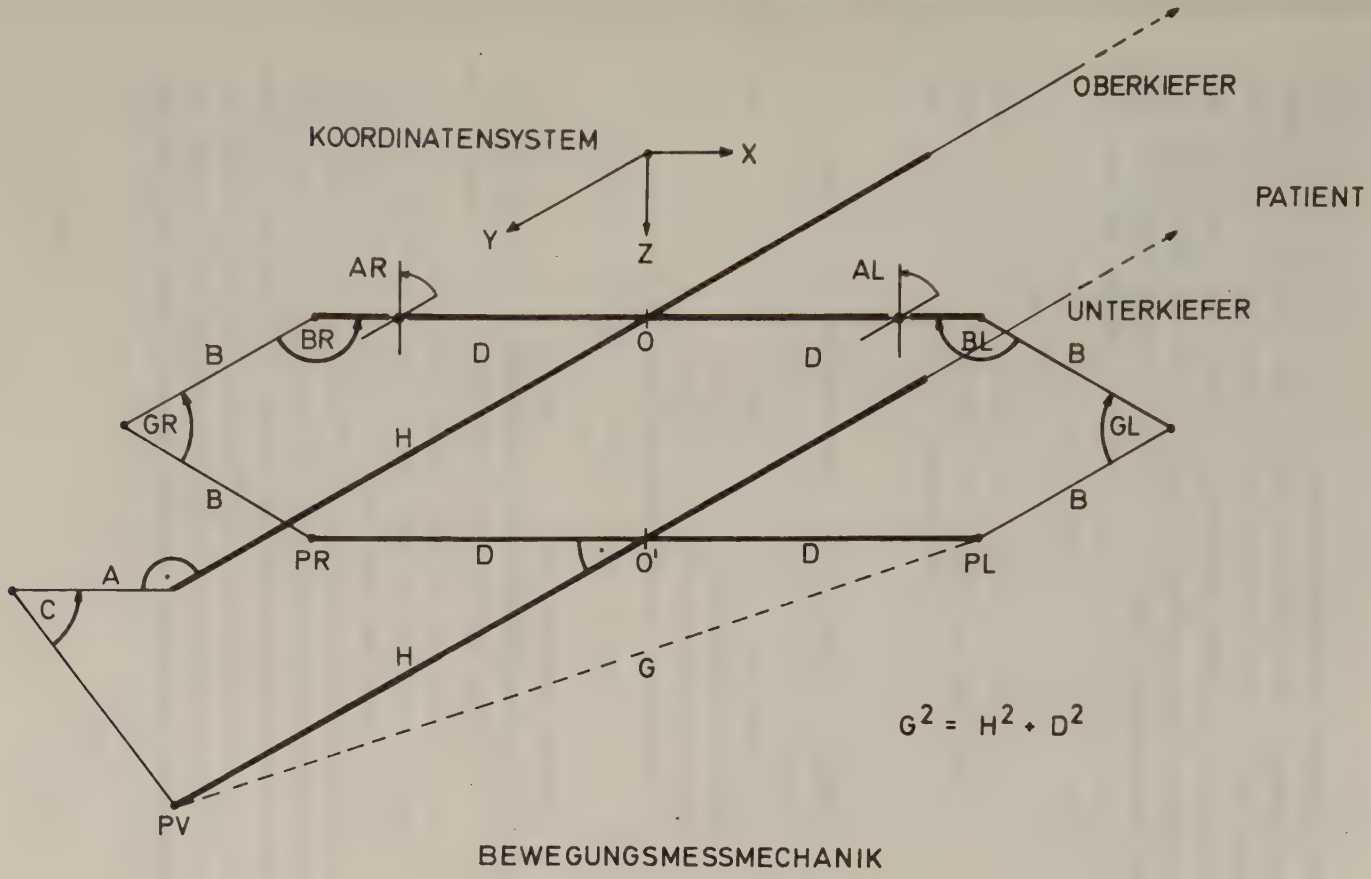
Bedingungen für den vorderen, dritten Punkt der Ebene : PV

$$Z = (X+A)*\tan(C)$$

$$(X-XL)'2 + (Y-YL)'2 + (Z-ZL)'2 - G'2 = 0$$

$$(X-XR)'2 + (Y-YR)'2 + (Z-ZR)'2 - G'2 = 0$$

Der Probandenschädel befindet sich in negativer Y-Richtung. Da das Mechanikoberteil durch die Befestigungsträger fest mit dem Oberkiefer verbunden ist, findet eine Inkorporation des Schädels in das Bezugskoordinatensystem der Bewegungsmeßmechanik statt. Somit ist der Schädel mit allen seinen Strukturen wie z.B. den Kondylenpfannen, dem Infraorbitalpunkt usw., räumlich im Koordinatensystem determiniert.



BEWEGUNGSMESSMECHANIK

Abb. 12 : Eckpunkte des Mechanik-Unterteils: PR = Rechts PL = Links PV = Vorne
Winkelgeber-Anordnung: AR, BR, GR = Rechts AL, BL, GL = Links C = Vorne
Ursprungspunkte der Koordinatensysteme: O = Oberteil O' = Unterteil
Verbindungsteile: A, B, D, H (= 5 cm)

Mechanikunterteil und Unterkiefer bilden durch die paraokklusäre Fixierung mittels Schiene eine geometrische Einheit. Alle Punkte des Unterkieferkörpers wie z.B. Inzisalpunkt, beliebige Zähne, Kondylen usw. sind somit in ihrer räumlichen Bewegung innerhalb des Koordinatensystems eindeutig festgelegt.
Die graphischen Bewegungsprojektionen werden zur Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE), d.h. zur Ebene die durch das rechte und linke Kondylendrehzentrum sowie den Infraorbitalpunkt festgelegt ist, ausgerichtet.
Durch eine dreidimensionale Transformation wird das Bezugskoordinatensystem mit der SOE zur Übereinstimmung gebracht. Vorraussetzung für diese Koordinatensystemtransformation ist die Bestimmung der Raumkoordinaten des Infraorbitalpunktes und der beiden Kondylendrehzentren.
Die Unterkieferbewegung wird gänzlich, also ohne jegliche Beschränkung auf einen bestimmten Projektionspunkt, erfaßt. Soll nun ein bestimmter Punkt des Unterkiefers in seiner Bewegung dargestellt werden, so wird die zuvor erfaßte Unterkieferbewegung dieses ausgewählten Punktes (z.B. Inzisalpunkt, Kondylus, etc.) projiziert. Es handelt sich hierbei um eine orthogonale Projektion, d.h. die Bewegungsbahnen werden in 3 Ebenen dargestellt.
Zur Festlegung der entsprechenden Raumkoordinaten eines zu projizierenden Unterkieferpunktes verwendet man die zusätzliche, separate Koordinatenbestimmungsmechanik.
Diese Koordinatenbestimmung kann zu einem beliebigen, späteren Zeitpunkt nach der Registrierung anhand des Unterkiefermodells stattfinden.
Alle Bewegungsbahnen der Registrierung sind auf Diskette abgespeichert und stehen somit jederzeit zu weiteren Projektionen und Analysen zur Verfügung.

Zur Darstellung der räumlichen Kondylenbewegung sind die Raumkoordinaten der beiden Kondylendrehzentren erforderlich. Dieser Koordinatenbestimmung geht eine mathematische Scharnierachsenlokalisation voraus.

Bei einer Registrierung am Artikulator ist der mathematische Ansatz einfach:

- Es wird aus der reinen Rotationsbewegung während des Öffnens und Schließens die transversale Rotationsachse (Scharnierachse) durch beide Kondylen bestimmt.
- Bei Bennett-Bewegungen rotieren die ruhenden Kondylen jeweils um eine vertikale Achse und bewegen sich zugleich auf der bereits bestimmten Scharnierachse nach lateral.
- Jede der beiden Rotationsachsen schneidet sich mit der Scharnierachse in je einem Punkt.
- Transliert man diese zwei Punkte um den Betrag der jeweiligen Bennettbewegung auf der Scharnierachse nach medial, so erhält man die gesuchten Kondylendrehzentren.

Die individuell verschiedenen Verhältnisse am Patienten machen ein weitaus komplizierteres und aufwendigeres Näherungsverfahren erforderlich:

- Aus mindestens 5 Öffnungs- und Schließbewegungen wird eine gemittelte Bewegungsbahn errechnet. Durch sukzessive Approximation mittels einer "Fit"-Routine wird beidseitig ein Punkt errechnet, durch den die Scharnierachse verläuft. Diese transversale Rotationsachse stimmt mit der Achse der geringsten Bewegung während der Scharnierbewegung überein. Sie entspricht der mit einem Scharnierachsenlokalisator gewonnen transversalen Scharnierachse.
- Um nun die Kondylendrehzentren genau lokalisieren zu können, wird mit einem ähnlichen Verfahren jeweils eine zweite, vertikale Rotationsachse ermittelt. Da diese nicht immer die bereits bestimmte horizontale Scharnierachse in einem Punkt schneidet, wird mathematisch die kürzeste Verbindungsgerade zwischen beiden Rotationsachsen ermittelt. Der Halbierungspunkt dieser Gerade wird als Kondylendrehzentrum angesehen.
- Sind die Koordinaten der Kondylendrehzentren bekannt so erfolgt die Projektion der Bewegung dieser Punkte.

Ähnlich geht man bei der Darstellung der Bewegung eines beliebigen, frei wählbaren Unterkieferpunktes (z.B. des Inzisalpunktes oder des mesiobuccalen Höckers vom Zahn 37) vor:
Mit Hilfe der Koordinatenbestimmungsmechanik werden die Raumkoordinaten des zu projizierenden Punktes im Koordinatensystem des Mechanikunterteils bestimmt. Der Ursprungspunkt (Punkt O') dieses Koordinatensystems liegt genau im Zentrum des Bewegungsmeßmechanikunterteils.

$$\text{Punkt } O' = (PL+PR)/2$$

Da die Bewegung der Unterkieferebene durch die Eck-Punkte PL,PR,PV eindeutig festgelegt ist, läßt sich somit auch die Bewegung eines jeden mit der Unterkieferebene verbundenen Punktes eindeutig projizieren.

Die Berechnung der Kondylenbahnneigungswinkel (Horizontale-Condylenbahn - Neigung = HCN) (37) und Bennett-Winkel (37) geschieht beidseitig wie folgt:
Der HCN-Winkel wird durch zwei Schenkel gebildet, die sich in dem errechneten Kondylendrehzentrum schneiden. Der kraniale Schenkel verläuft in der Scharnierachse-Orbital-Ebene, rechtwinklig zur Interkondylarachse. Der kaudale Schenkel ergibt sich durch Verbindung des oben erwähnten Schnittpunktes mit einem auf der Protrusionsbahn des Kondylus 5 mm ventral-kaudal liegenden Punktes.
Der transversale Bennett-Winkel wird wiederum durch das Kondylendrehzentrum und durch die Protrusion- und Laterotrusionsbahn begrenzt. Auch hier wird jeweils eine Wegstrecke von 5 mm angenommen.

Eine genaue Beschreibung der verwendeten mathematischen Verfahren würde an dieser Stelle zuweit führen. Im mathematischen Anhang wird die im Programm verwandte Projektionsroutine näher beschrieben. Für weitere diesbezügliche Hinweise sei auf die Spezialliteratur verwiesen (44,50).

5. Methodik der Registrierung

Im folgenden soll der genaue Ablauf einer Registrierung am Probanden schrittweise dargestellt werden:

5.1. Vorbereitende labortechnische Maßnahmen

Nach Abdrucknahme des Ober- und Unterkiefers mit Alginat erfolgt die Herstellung von Hartgipssituationsmodellen. Zur Anfertigung der paraokklusären Schienen für Ober- und Unterkiefer werden konfektionierte, halbkreisförmige Kunststoffträger mit Kaltpolymerisat derart modifiziert, daß im Frontzahnbereich eine und im Seitenzahnbereich jeweils zwei Verbindungen zu den Vestibulärflächen von günstig stehenden Zähnen entstehen. Diese Zähne müssen durch den Kunststoff teilweise körperlich gefaßt werden. Beide Schienen müssen zur Okklusionsebene und Kiefermittellinie ausgerichtet sein. Es ist darauf zu achten, das die Schienen weder die Okklusion noch Artikulation in irgendeiner Weise stören. Dies erreicht man am einfachsten durch Einschleifen in einem Artikulator. Eine ausreichende Stabilität der Schienen sichert ihre mehrmalige Verwendbarkeit.

5.2. Vorbereitungen am Probanden

Nachdem man sich von der Betriebsbereitschaft des Systems überzeugt hat, erfolgt die Eingabe der persönlichen Probandendaten in den Rechner. Das Programm sieht die Möglichkeit vor, zusätzliche Bemerkungen über die bevorstehende Registrierung einzugeben.
Danach erfolgt die Einprobe der Schienen im Munde des Probanden. Überkonturierungen und Druckstellen werden entfernt. Die Schienen müssen eindeutig zu reponieren sein. Nach dünnem Auftragen des viskösen Sekundenklebers auf die

Klebestellen erfolgt das Einsetzen der Schienen im Ober- und Unterkiefer bei relativer Trockenlegung. Nach 2 Minuten überprüft man die Schienen auf festen Sitz und eventuelle Frühkontakte bei maximaler Interkuspitation. Alle den Probanden irritierenden und störende Einflüsse sollten weitgehendst beseitigt werden.
Es besteht die Möglichkeit, eine Bißsperrung im Munde des Probanden mit Hilfe eines Stützstiftes oder Jigs vorzunehmen.

5.3. Bestimmung des Infraorbitalpunktes

Die Koordinatenbestimmungsmechanik wird auf den Oberkieferbefestigungsträger aufgesteckt und durch eine Arretierungsschraube fixiert. Dann werden die elektrischen Verbindungen zum Meßwerterfassungssystem durch Steckkontakte hergestellt Nach Bereitschaftsmeldung des Programms wird die Zeigespitze auf den rechten oder linken Infraorbitalpunkt (Hautpunkt unterer Orbitarand) aufgesetzt. Auf Tastendruck am Rechner werden die Raumkoordinaten ermittelt und abgespeichert. Bei Bedarf kann die Messung auf der anderen Seite wiederholt werden. Nach Beendigung der Koordinatenbestimmung wird die Mechanik abmontiert.

5.4. Montage der Bewegungsmeßmechanik

Ober- und Unterteil der Mechanik werden bei halbgeöffnetem Mund des Probanden auf die Befestigungsträger gesteckt und arretiert.
Nach dem Anschluß der Mechanik an das Meßwerterfassungssystem werden mit dem Probanden die zu registrierenden Bewegungsmuster mehrmals geübt. Hierbei entscheidet der Behandelnde, ob die Bewegungen frei (aktiv) oder unter leichter Führung (passiv) durchgeführt werden sollen.

5.5. Unterkieferbewegungsregistrierung

Ausgangsposition aller Registrierungsabschnitte ist die maximale Interkuspitation.
Zuerst erfolgt die Registrierung der Öffnungs- und Schließbewegungen(Rotation). Unter leichter, retraler Führung wird der Unterkiefer ca. 5-mal geöffnet und geschlossen. Dabei sollte jegliche Vorschubbewegung der Kondylen vermieden werden. Das Bewegungsmuster entspricht dem bei einer herkömmlichen Scharnierachsenlokalisation (z.B. mit einem Almore-Lokalisator).
Nachdem die Werte für die späteren Berechnungen auf eine Diskette abgespeichert worden sind, erfolgt die eigentliche Registrierung der zu untersuchenden Bewegungen.

Je nach Untersuchungsziel erfolgt die Erfassung der Unterkieferbewegung mit unterschiedlicher Frequenz.
Sollen sehr kurzzeitige Ereignisse wie z.B. Gelenkknacken, Luxationen genau registriert werden, so empfiehlt sich die Aufzeichnung mit hoher Frequenz (bis zu 60 Hz).
Bei längeren, kontinuierlich verlaufenden Bewegungen wie z.B. Kaubewegungen genügt in der Regel eine niedrige Erfassungsfrequenz von 30 Hz. Die zur Verfügung stehende Registrierzeit (7,5 - 15 Sek. / Zyklus) steht in direktem Zusammenhang mit der Frequenzwahl.
Sie errechnet sich wie folgt:

Registrierzeit = Zahl der Meßpunkte (hier=450) / Frequenz

Zu Beginn eines jeden Registrierzyklus muß die maximale Interkuspitation als Ausgangspunkt einmal eingenommen werden. Ansonsten sind für die Registrierungen keinerlei Beschränkungen des Bewegungsablaufes nötig.

Als Bespiel sei eine typische Bewegungssequenz zur Bestimmung der Grenzbewegungen bei freier Unterkieferbewegung beschrieben:

Schlußbißstellung (max. Interkuspitation)
I
** START **
I
Max. Protrusion
I
Schlußbißstellung
I
Rechtslateralbewegung
I
Schlußbißstellung
I
Linkslateralbewegung
I
Schlußbißstellung
I
Einnahme der retrudierten Kontaktposition (RKP)
I
** ENDE **

Nach Beendigung des Registrierzyklus (450 Punkte) werden die Werte auf Diskette abgespeichert. Bei Bedarf können beliebig viele weitere Registrierungen am selben Probanden nacheinander angeschlossen werden.

5.6. Demontage der Registriervorrichtung

Alle elektrischen Verbindungen werden unterbrochen, die Arretierungsschrauben gelöst, und die Bewegungsmeßmechanik bei leicht geöffneten Mund des Probanden von den Befestigungsträgern gezogen.
Die angeklebten, paraokklusären Schienen entfernt man durch eine kurze, ruckartige Bewegung zum Gegenkiefer. Aufgrund der sehr spröden Konsistenz des Sekundenklebers lassen sich alle Reste problemlos von den Zahnoberflächen und Gingivalbereichen beseitigen.

5.7. Berechnung der Unterkieferbewegung

Die auf Disketten abgespeicherten Registrierzyklen werden nun nacheinander vom Rechner eingelesen, in Koordinatentripel umgerechnet und wieder als projektionsfähige Bewegungsbahnen auf Disketten abgespeichert.
Das System benötigt für diesen Vorgang ca. 5 Minuten pro Zyklus. Nach diesem vorbereitenden Schritt erfolgt die mathematische Scharnierachsenlokalisation mit Berechnung der Raumkoordinaten der beiden Kondylenmittelpunkte und der Bestimmung des Interkondylarabstandes.

5.8. Darstellung der räumlichen Kondylenbewegung

Anhand der ermittelten Kondylenkoordinaten erfolgt die Projektion der jeweiligen Unterkieferbewegung auf dem Grafikbildschirm des Rechners. Da alle 450 Punkte gemäß der Registrierung nacheinander dargestellt werden, kann man den zeitlichen Bewegungsablauf am Bildschirm genau verfolgen. Bewegungscharakteristika lassen sich somit leicht beobachten und terminieren. Bei Bedarf kann ein graphischer Ausdruck des dargestellten Bildes erfolgen (Hardcopy). Es besteht außerdem die Möglichkeit, mehrere Kondylenbahnen verschiedener Registrierungen in einem Bild übereinander zu projizieren.

5.9. Darstellung der Bewegung eines beliebigen Unterkieferpunktes

Derselbe Unterkiefer-Befestigungsträger des Probanden, der bereits bei der Bewegungsregistrierung Verwendung fand, wird nun am Unterkiefersituationsmodell mit Sekundenkleber angeklebt. Ebenso wie im Mund des Probanden ist hier auf einen einwandfreien und reproduzierbaren Sitz der paraokklusären Schiene zu achten.

Nun wird die Koordinatenbestimmungsmechanik auf den Befestigungsträger aufgesteckt, arretiert und an das Meßwerterfassungssystem angeschlossen. Die stylusförmige Zeigespitze wird zu dem zu projizieren Punkt geführt und aufgesetzt. Danach werden die Koordinaten auf Tastendruck vom Rechner eingelesen und abgespeichert. Bei Bedarf können mehrere Punkte hintereinander gespeichert werden.
Nach Einlesen des gewünschten Registrierzyklus von Diskette kann die graphische Darstellung der räumlichen Bewegungsbahnen der Unterkieferpunkte auf dem Bildschirm erfolgen. Auch hier kann ein Ausdruck des Bildschirminhaltes und Übereinanderprojektion meherer Bewegungsbahnen stattfinden.

5.10. Dokumentation der Ergebnisse

Im Anschluß an die Berechnungen und Darstellungen lassen sich alle ermittelten Parameter in Form eines Registrierprotokolls ausdrucken. Hierzu wird neben den persönlichen Daten des Probanden folgendes aufgelistet (Abb.19):

- Die Raumkoordinaten der beiden Kondylendrehzentren
- Der Interkondylarabstand
- Die Winkel zwischen der Scharnierachse-Orbital-Ebene und den Achsen des am Oberkiefer befestigten Mechanikoberteils in sagittaler und horizontaler Richtung
- Die beidseitige horizontale Kondylenbahnneigung (HCN)
- Die beidseitigen Bennett-Winkel

Zusätzlich werden alle diese Werte auch auf der Patientendiskette abgespeichert. Die Grafikausdrucke erfolgen auf Endlosformularen und lassen sich somit leicht archivieren. Bei Bedarf können auch die Koordinatentripel der Eckpunkte PR,PL,PV der Unterkieferebene sowie wichtige Zwischenergebnisse des Scharnierachsenlokalisationsprogramms ausgedruckt werden.

6. Eigene Untersuchungen

An 3 Artikulatoren und einem Probanden wurde das von mir entwickelte Unterkieferbewegungs-Registriersystem E C R S (= Elektronisches, Computergestütztes Registrier - System) bei der Registrierung von Unterkieferbewegungen auf Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit untersucht.
Ziel der Untersuchung war die Verifizierung der durch das ECRS ermittelten Ergebnisse.

6.1. Artikulatorenvergleich

Folgende drei Artikulatoren wurden mit dem ECRS verglichen:

a) DENTATUS (Non-Arcon)
b) SAM (Arcon)
c) WHIP-MIX (Arcon)

Günstig ist bei diesen Artikulatoren, daß sie den gleichen Interkondylarabstand aufweisen. Diese konstruktionstechnische Übereinstimmung vereinfachte die Untersuchungen.

Wir haben folgende Parameter untersucht:

1. Horizontale Kondylenbahnneigung (HCN)
2. Bennettwinkel (BW)
3. Bennett'sche Lateralbewegung (BL)
4. Gelenkbahnweg bei maximaler Protrusion
5. Interkondylarabstand
6. Winkel zwischen Kauebene und Scharnierachse-Orbital-Ebene
7. Abstand (Radius) zwischen der Artikulatorscharnierachse und dem Mittelpunkt des ECRS-Mechanikoberteils

Vorraussetzung für diese Untersuchung waren einheitliche Ober- und Unterkiefermodelle, die mittels eines Gesichts-

bogens in allen drei Artikulatoren identisch einartikuliert wurden.
Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des ECRS nachweisen zu können, wurden 2 Serien von Messungen mit unterschiedlich einartikulierten Modellsätzen durchgeführt.
Die Ergebnisse der nachfolgenden Messungen wurden mit mechanischen Präzisionsschieblehren, Tasterzirkeln und Winkelmessern auf Genauigkeit untersucht. Teilweise wurden auch einfache optische Verfahren, wie z.B. Distanz- und Winkelmessung, über Visierlinien verwendet.

6.1.1. Herstellung der Versuchsmodelle

Es wurden für jede der beiden Versuchsserien jeweils 3 Ober- und Unterkiefermodelle in Superhartgips ausgegossen. Um die Identität aller Modelle zu gewährleisten, verwendeten wir für alle 12 Ober- bzw. Unterkiefermodelle den gleichen Satz Silikonformen ('Stuttgarter Modelle' der Fa. Frasaco). Alle Modelle wurden auf einwandfreie Okklusion untersucht. Frühkontakte und Gipsbläschen wurden entfernt. Abschließend erfolgte eine Oberflächenglättung und Porenversiegelung mit JELENCO Modellspray.

6.1.2. Einartikulierung der Referenzmodelle

Ein Satz Gipsmodelle (Ober- und Unterkiefer) wurden ohne Hilfsvorrichtung in einen DENTATUS Artikulator im Winkel von ungefähr 15 Grad zum Artikulatoroberteil eingegipst. Die Mittellinie des Unterkiefermodells stimmte annähernd mit der Artikulatormitte überein; der Unterkieferinzisalpunkt befand sich auf halber Höhe zwischen Artikulatorober- und -unterteil.
Um die Reproduzierbarkeit des ECRS überprüfen zu können, wurde ein weiterer Satz Gipsmodelle in den DENTATUS Artikulator eingebracht, allerdings in einer geringfügig

veränderten Lage. Dabei haben wir die Neigung der Kauebene vergrößert, beide Modelle befanden sich etwas nach lateral verschoben (bei Betrachtung von frontal), und der Unterkieferinzisalpunkt lag, verglichen mit obiger Anordnung, weiter kaudal.
Somit standen zwei individuell einartikulierte Modellsätze mit unterschiedlicher räumlicher Ausrichtung als Referenz zur Verfügung.

6.1.3. Übertragung der Modellorientierung in die anderen Artikulatoren

Hierzu eignete sich der DENTATUS - Mittelwertgesichtsbogen besonders gut. Er ermöglichte eine einfache und genaue Übertragung in alle drei Vergleichsartikulatoren. Lediglich die unterschiedlichen Scharnierachsansätze erforderten kleinere Änderungen. Die Ausrichtung der Scharnierachszeiger des Gesichtsbogens am WHIP-MIX Artikulator erfolgte mit Hilfe des Montageteils (Mount Fixture Art.Nr. 608700). Nach Montage des Gesichtsbogens an dem jeweiligen Artikulator und Ausrichtung mittels Orbitalanzeiger fand die eigentliche Übertragung und Einartikulierung der Oberkiefermodelle statt. Die Unterkiefermodelle wurden nach der Lauritzen-Methode(41) mit XANTHANO-Gips einartikuliert.

6.1.4. Herstellung und Befestigung der paraokklusären Schienen am Modell

Zwei konfektionierte Befestigungsträger wurden im Ober- bzw. Unterkiefer mit den Zähnen 15,14,11,21,24,25 bzw. 35,34,31,41,44,45 durch Brücken aus Kaltpolymerisat flächig verbunden, Überkonturierungen entfernt, Okklusion und Artikulation überprüft. Beide Schienen saßen auf allen einartikulierten Ober- bzw. Unterkiefermodellen bereits ohne Klebstoff einwandfrei und reponierbar.

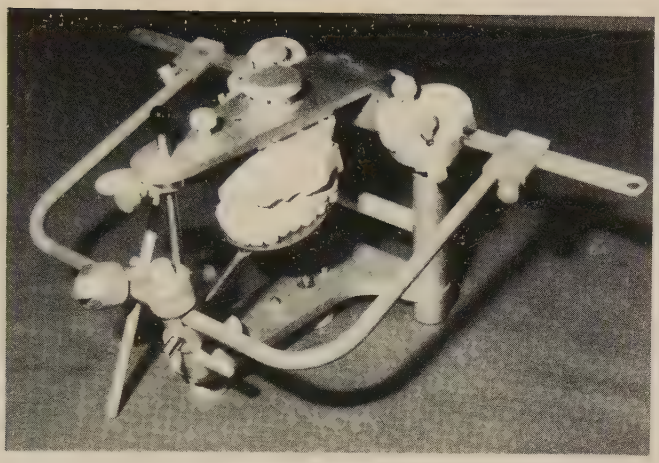


Abb.13:Übertragung der Modellorientierung mit Gesichtsbogen

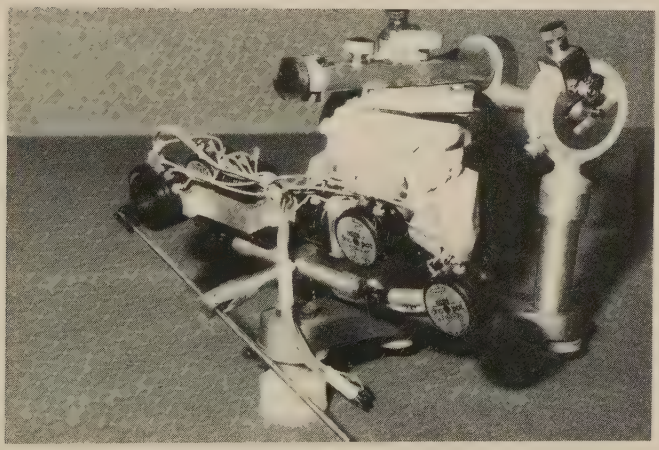


Abb.14 : ECRS am DENTATUS montiert

Ein spürbares Spiel war nicht festzustellen. Die Befestigung der Ober- und Unterkieferschiene am Modell erfolgte, wie am Probanden, unmittelbar vor der eigentlichen Registrierung mit dem sehr viskösen Sekundenkleber TECHNICOLL 8201.
Bei allen Modellen wurden bei angeklebter Schiene in den 3 Artikulatoren nochmals Okklusion und Artikulation auf eventuelle Störkontakte überprüft.

Nach oben beschriebenen Vorbereitungen lagen vor Versuchsbeginn folgende Verhältnisse vor:
- 2 Versionen jeweils identisch einartikulierter und übereinstimmender Ober- und Unterkiefermodelle in 3 Artikulatoren (DENTATUS, SAM und WHIP-MIX)
- Die zweite Einartikulierungsversion unterschied sich von der ersten durch eine leicht geänderte räumliche Lage des Referenzmodells.

6.1.5. Versuchsdurchführung

Bei jedem der drei Artikulatoren wurde der folgende Versuchsablauf durchgeführt:

Schritt 1: Montage der Ober- und Unterkieferbefestigungsträger an den einartikulierten Modellen

2: Initialisierung des Systems (Programmstart)

3: Ermittlung der Raumkoordinaten des Infraorbitalpunktes mit der Koordinatenbestimmungsmechanik:
- Aufstecken und Arretieren der Mechanik auf dem Oberkieferbefestigungsträger
- Aufsuchen des Orbitalzeigers am Artikulator mit der stylusförmigen Spitze
- Einlesen und Abspeichern der Koordinaten auf Tastendruck

Schritt 4: Aufstecken und Arretieren der Bewegungsmeß-
mechanik auf den Befestigungsträgern

5: Programmierung der horizontalen Kondylenbahn-
neigung (HCN) und Bennett-Winkel (BW) am
Artikulator nach Tab. 1

6: Nachfahren und Registrieren der maximalen
Bewegungsbahnen unter Zahnkontakt

Ausgangsposition (Max. Interkuspitation)
I
** START **
I
Öffnungs- und Schließbewegung (Rotation)
I
Max. Rechtslateralbewegung
I
Rückführung in die Ausgangsposition
I
Max. Linkslateralbewegung
I
Rückführung in die Ausgangsposition
I
Max. Protrusionsbewegung
I
Rückführung in die Ausgangsposition
I
** ENDE **

7: Abspeichern der Registrierdaten auf Disketten

8: Änderung der Artikulatoreinstellung nach Tab. 1

9: Neue Registrierung (siehe Schritt 5-7)

Schritt 10: Nach Beendigung der Registrierung erfolgt die Demontage der Bewegungsmeßmechanik

11: Reinigung der Modelle und paraokklusären Schienen von Kleberresten

12: Auswertung der Daten durch den Rechner (Abspeichern aller Ergebnisse auf Disketten)

12: Ausdruck des Registrierprotokolls und der grafischen Darstellungen

13: Nächste Messung ==> Schritt 5

Folgende Messungen wurden an jedem Artikulator durchgeführt

Tabelle 1

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
HCN (in Grad)	0	0	30	30	60	60
Bennett-Winkel	0	10	0	20	0	30

Eine Messung setzte sich aus jeweils zwei Registrierungen, 1. und 2. Einartikulierungsversionen, zusammen.
Die Messungen Nr. 1/2 , 3/4 , 5/6 unterschieden sich durch unterschiedliche Gelenkbahnneigung (HCN) beider Kondylen. Der Bennett-Winkel wurde von 0 grad auf 30 Grad in 10 Grad Intervallen beidseitig variiert.
Die Messungen wurden an jedem Artikulator mit zwei unterschiedlich einartikulierten Modellsätzen (1. und 2. Einartikulierungsversion) durchgeführt. Bei 3 Artikulatoren wurden somit insgesamt 36 Einzelregistrierungen aufgezeichnet. Jede der 36 Registrierungen umfaßte einen kompletten Registrierzyklus (450 Punkte) bei einer Registrierfrequenz von 30 Hz.

6.1.6. Bestimmung der räumlichen Lage der beiden Referenzmodellsätze

Um die Korrektheit der durch das ECRS errechneten Ergebnisse überprüfen zu können, erfolgte eine genaue Bestimmung der räumlichen Lage eines der beiden Oberkiefermodelle (1. Einartikulierungsversion) im DENTATUS - Artikulator mittels mechanischer Präzisionsmeßhilfen.
Diese gemessenen Distanzen, Koordinaten und Winkel stellten die tatsächlichen Referenzwerte dar. Sie wurden mit den durch das ECRS gewonnenen Daten verglichen.
Um die Raumkoordinaten der beiden Artikulator-Kondylen im Bezug auf das Koordinatensystem der Bewegungsmeßmechanik leicht bestimmen zu können, haben wir uns ein einfaches Meßgestell aus Teilen des SAM - Axiographen konstruiert.

An einer rechtwinklig zur Mechaniklängsachse stehenden Querstange des Meßgestells wurden zunächst rechts- und danach linksseitig, parallel zur Längsachse verlaufende Ausleger mit vertikalen Schreibplatten befestigt. Sie waren in ihrer Länge verstellbar und ließen sich somit auf die beiden Kondylenmittelpunkte ausrichten. Die Querstange verlief, in frontaler Ansicht gesehen, parallel zur Horizontalebene der Bewegungsmeßmechanik.

Das Meßgestell wurde an dem oberen Teil der Bewegungsmeßmechanik mit Klebstoff befestigt und zusammen mit diesem auf den Oberkieferbefestigungsträger gesteckt, arretiert und befand sich somit in einer zu dem oberen Teil der Bewegungsmeßmechanik parallelverschobenen Position.
Nach genauer Ausrichtung der beiden Ausleger, Anziehen aller Schrauben und Markierung der Kondylenmittelpunkte auf den Schreibplatten, konnten mit Hilfe einer Schieblehre die Raumkoordinaten der beiden Artikulatorkondylenmittelpunkte im Bezug auf das Ursprungskoordinatensystem genau vermessen werden.

Folgende Distanzen und Winkel haben wir am DENTAUS - Artikulator bei einem der beiden Referenzmodellsätze (1. Einartikulierungsversion) bestimmt:

1. Abstände zwischen dem Mittelpunkt der Bewegungsmeß-mechanik und den beiden Kondylenzentren

2. Interkondylarabstand (110 mm)

Diese 3 Strecken bilden ein Dreieck, aus dessen Schenkeln sich der Abstand des Punktes O zur Scharnierachse geometrisch errechnen läßt. Dieser Abstand stellt den Radius der Rotationsbewegung während der Öffnungs- und Schließbewegung dar.

3. Radius der Rotationsbewegung (133 mm), gemessen vom Punkt O der Bewegungsmeßmechanik bis zur Verbindungsachse beider Kondylenmittelpunkte

4. Raumkoordinaten der beiden Kondylenzentren, zusammengesetzt aus einer horizontalen, einer sagittalen und einer vertikalen Komponente

Kondylendrehzentren:

(Angaben in mm)

	Rechts	Links
X-	-63	+47
Y-	-132	-134
Z-	-10	-11

5. Winkel zwischen Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE) und der Meßgestellängsachse (entspricht der Bewegungsmeß-mechaniklängsachse)

Winkel = 15 Grad

6.1.7. Ausmessen der konstruktionsbedingten Artikulatorparameter

Folgende Abstände und Wegstrecken wurden an den 3 Versuchsartikulatoren mit Schieblehren abgemessen:

Tabelle 2

Artikulator	IK	MP	MMTB	MSB	BH
DENTATUS	110	11,5	11,5	4,0	142
SAM	110	14,5	14,5	4,0	108
WHIP-MIX	110	20,5	20,5	4,0	95

(Angaben in mm)

Abkürzungen:

IK = Interkondylarabstand
MP = Max. Protrusionsbahn
MMTB = Max. Mediotrusionsbahn
MSB = Max. Seitwärtsbewegung (bei 20 Grad Bennett-Winkel)
BH = Bauhöhe (Innenmaß Oberteil - Unterteil)

Keiner der verwendeten Artikulatoren erlaubte eine initiale Bennettbewegung.

6.1.8. Ausdrucken und Analysieren der ECRS-Ergebnisse

Die insgesamt 36 einzelnen, graphischen Bildschirmdarstellungen und 36 Registrierprotokolle wurden in doppelter Ausführung ausgedruckt und archiviert. Der Vergrößerungsfaktor für die graphische Darstellung wurde so gewählt, daß die Wegstrecken auf den Ausdrucken im Verhältnis 1:1 mit den

tatsächlichen Strecken übereinstimmten. Mit Zentimetermaß, Schieblehre und Präzisionswinkelmesser wurden nun die einzelnen Winkel- und Streckenparameter an den ECRS-Darstellungen bestimmt und in Tabellen eingetragen (siehe Ergebnisteil).
Hierbei erfolgte der eigentliche, quantitative Vergleich mit den an den 3 Artikulatoren gemessenen und oben ausgeführten Werten.
Da die Modellsätze einer Einartikulierungsversion identisch einartikuliert waren und die jeweilige Artikulatoreinstellung bei allen drei Artikulatoren übereinstimmte, konnten nun auch die einzelnen Registrierungen, z.B. mit gleicher HCN- und Bennett-Winkel Einstellung, untereinander verglichen werden.
Bezugsebene bei allen sagittalen Winkelmessungen (z.B. HCN) war die Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE), die als Linie am oberen Rand des graphischen Ausdrucks dargestellt wurde. Die Scharnierachse, auf die alle horizontalen Winkel (z.B. Bennett-Winkel) bezogen sind, verläuft auf den graphischen Darstellungen durch die Ausgangspunkte aller initialen Bewegungssegmente.

6.2. Ergebnisse des Artikulatorenvergleiches

6.2.1. Kondylenlokalisation

Bei allen drei Artikulatoren wurde bei jeder der 12 Einzel-Registrierungen eine Kondylenlokalisation durch das ECRS vorgenommen. Das Programm lieferte die Raumkoordinaten der beiden Kondylen. Diese Ergebnisse wurden mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen.
Abb.15 zeigt eines der Registrierprotokolle, wie sie der Rechner nach 5 Minuten Rechenzeit erstellte.

ECRS-Registrierprotokoll: Nr.: 82/16

Patientenname: DENTATUS-Artikulator Geb.-Datum: --------

Datum der Registrierung : 14.05.82 Behandler: A.L.

Bemerkungen: Grundregistrierung mit Einstellung: 30/20 Grad
Prot.- Lateralbewegung rechts / links

Kondylen-Lokalisation:

Radius der Rotation = 134,5 mm

Koordinaten	I	Rechts	I	Links	(in mm)
Horizontal (X)	I	- 63,6	I	46,4	
Sagittal (Y)	I	-135,4	I	-133,6	
Vertikal (Z)	I	- 10,2	I	- 10,9	

Interkondylarabstand = 110,0 mm

HCN	I	31,0	I	30,9	(in Grad)
Bennett-Winkel	I	20,1	I	21,0	

Winkel zwischen Mechanikebene und SOE = 8,5 Grad

Abb.15 : ECRS-Registrierprotokoll beim Artikulator

Aus den insgesamt 36 einzelnen Registrierprotokollen wurden für jeden Artikulator exemplarisch jeweils eines herausgegriffen. Die aus den Registrierprotokollen entnommenen ECRS-Werte wurden mit den an den Artikulatoren gemessenen Werten verglichen. Die Bestimmung dieser Referenzwerte erfolgte mit Hilfe der unter 6.1.6. beschriebenen Meßvorrichtung.
Das Ergebnis des Vergleichs der ECRS-Werte mit den jeweiligen Referenzwerten ist in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 3

ECRS-Werte	Kondylenmittelpunkte					
	Rechts			Links		
	XR	YR	ZR	XL	YL	ZL
DENTATUS	-63	-132	-10	47	-134	-11
SAM	-61	-135	-11	49	-133	-12
WHIP-MIX	-62	-135	-12	51	-138	-7
Mittelwert	-62	-134	-11	49	-135	-10
Std. Abw.	1,0	1,73	1,0	2,0	2,65	2,65
Gemessene Werte	-62	-132	-10	48	-133	-12
Differenz	0	-2	-1	+1	-2	+2

(Angaben in Millimeter)

XR,YR,ZR = Raumkoordinaten des rechten Kondylenmittelpunkts
XL,YL,ZL = " " linken "

Die aufgeführten Werte sind auf Ganzzahlbeträge gerundet.

6.2.2. Interkondylarabstand

Aus den oben aufgeführten ECRS-Werten für die Kondylenmittelpunkte der Artikulatoren wurde der Interkondylarabstand (IK) per Programm wie folgt berechnet:

$$IK = \sqrt{(XL-XR)'2 + (YL-YR)'2 + (ZL-ZR)'2}$$

Hierbei ergaben sich folgende Ergebnisse (Tabelle 4) :

Artikulator	ECRS-Wert	Realer Wert	Differenz
DENTATUS	110,2 mm	110,0 mm	0,2 mm
SAM	111,1 mm	110,0 mm	1,1 mm
WHIP-MIX	109,1 mm	110,0 mm	0,9 mm

Die letzte Spalte gibt jeweils die Abweichnung des ECRS-Wertes an.

6.2.3. Maximale Längen der Kondylenbahnen

Von jedem Artikulator wurden jeweils drei graphische Darstellungen willkürlich ausgewählt und nach den Längen der Protrusionsbahnen und Lateralbewegungen ausgemessen. Aus den jeweils drei Werten wurde ein Mittelwert gebildet.

Tabelle 5

Artikulator	Mediotrusion	Seitwärtsbeweg.	Protrusion
DENTATUS	11,5 mm (0)	4,5 mm (+0,5)	11,2 (-0,3)
SAM	16,0 mm (+1,5)	3,9 mm (-0,1)	14,1 (-0,4)
WHIP-MIX	19,5 mm (-1,0)	4,2 mm (+0,2)	21,6 (+1,1)

Die eingeklammerten Werte stellen die jeweiligen Abweichungen der ECRS-Werte von den unter 6.1.7. bestimmten Artikulatorparametern dar.

6.2.4. Grafikausdrucke der Kondylenbahnen

Von allen 36 Einzelregistrierungen mit unterschiedlichen Gelenkbahnneigungs- und Bennett-Winkeln wurden Grafikausdrucke in 3-facher Vergrößerung erstellt.
Die folgende Schemazeichnung (Abb.16) dient der Veranschaulichung der graphischen Darstellung einer Grundregistrierung am Artikulator.

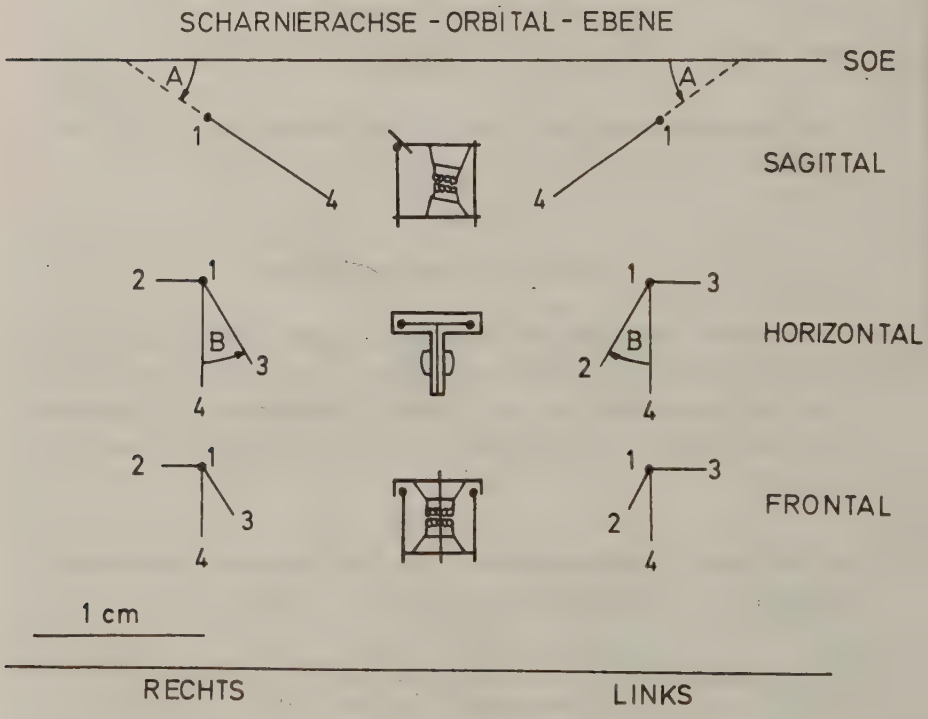


Abb. 16 : Orthogonale Projektion der Kondylenbewegung am Artikulator (schematisiert)

Der lange, durchgezogene Strich am oberen Rand eines jeden graphischen Ausdrucks repräsentiert die Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE).
Die beiden räumlichen Kondylenbahnen sind jeweils in drei Projektionsansichten orthogonal dargestellt:

Obere Bewegungsbahn ==> sagittale Projektion
Mittlere Bewegungsbahn ==> horizontale Projektion
Untere Bewegungsbahn ==> frontale Projektion

Die Darstellung der Kondylenbewegungsbahnen (rechte bzw. linke Seite) verhält sich identisch zu der Perspektive beim frontalen, sagittalen bzw. kranialen Betrachten des Artikulators. Die rechten Bewegungsbahnen auf den graphischen Ausdrucken stellen die Bewegungen des rechten Kondylus dar. Der linke Kondylus wird somit auf der linken Hälfte des graphischen Ausdrucks dargestellt.
Die einzelnen Bewegungssegmente sind wie folgt bezeichnet:

1 = Maximale Interkuspitation (IKP)
2 = Rechte Lateralbewegungsbahn
3 = Linke Lateralbewegungsbahn
4 = Maximale Protrusionsbahn
A = Horizontale Kondylenbahnneigung (HCN)
B = Bennett - Winkel

Bei der horizontalen Projektion entspricht der obere Bildrand der dorsalen, der untere der ventralen Seite. Dies stimmt wiederum mit der bereits oben beschriebenen frontalen Betrachungsperspektive überein.
Am linken, unteren Bildrand wird bei jedem Ausdruck unmittelbar oberhalb der Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE), eine Maßstabsskalierung hinzugefügt. Die gesamte Länge des Strichs entspricht genau 10 mm (= 1 cm) realer Wegstrecke. Diese Skalierung ist von dem gewählten Vergrößerungsfaktor abhängig. Sie dient der metrischen Beurteilung von einzelnen Bewegungsbahnen bzw. -segmenten.

Da sich die einzelnen ausgedruckten Darstellungen nur in den HCN- und Bennett-Winkeln unterscheiden, wurden hier nur zwei ECRS-Registrierungen exemplarisch abgebildet.
Die vollständige Zusammenstellung der ermittelten Gelenkbahnparameter ist den Tabellen unter 6.2.6. zu entnehmen.

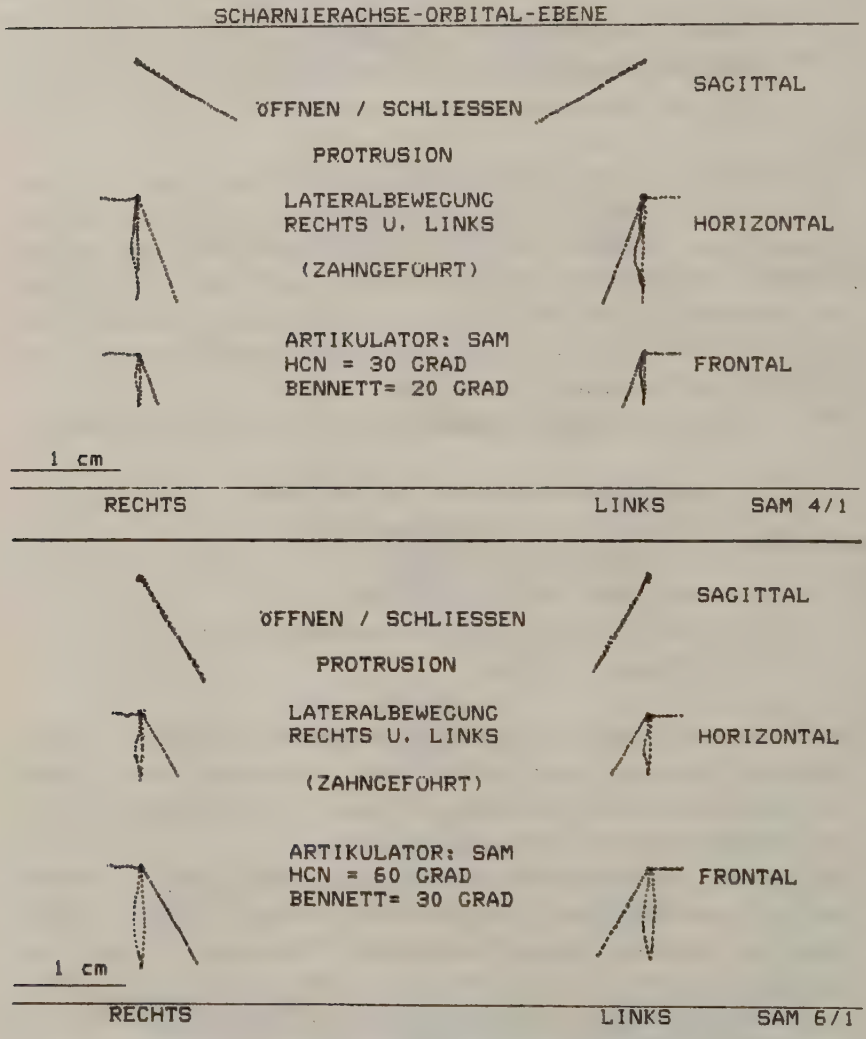


Abb.17: Grafikausdruck zweier ECRS-Artikulatorregistrierungen

6.2.5. Bestimmung der Gelenkbahnparameter

Anhand der 36 graphischen Ausdrucke wurden die Horizontale-Condylenbahn-Neigung (HCN) und die Bennett-Winkel auf der rechten und linken Seite bestimmt. Durch Verlängerung der jeweiligen Kondylenbahnen auf dem Ausdruck konnten nach Anlegen eines Winkelmessers die entsprechenden Winkelwerte bestimmt werden.
Die beiden Winkel wurden wie folgt festgelegt:

1. H C N :
   Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE) -- Protrusionbahn

2. Bennett-Winkel :
   Protrusions- und Mediotrusionsbahn in der horizontalen Projektion

Die so gemessenen Winkel wurden in Tabellen eingetragen und mit den tatsächlichen Artikulatoreinstellungen verglichen. Jede Messung wurde an zwei unterschiedlich einartikulierten Modellsätzen vorgenommen.

6.2.6. Tabellarische Zusammenstellung

Die 6 Artikulatoreinstellungen stellten die Vergleichswerte dar. In den nachfolgenden Tabellen (Messung Nr. 1-6) wurden die 2 unterschiedlich einartikulierten Modellsätze mit
"1. Einartikulierungsversion" bzw. mit
"2. Einartikulierungsversion" betitelt.
Hinter den absoluten Werten für HCN und Bennett-Winkel, die jeweils für rechts und links getrennt eingetragen sind, ist in einer 2. Spalte jeweils der Differenzbetrag aufgeführt. Aus beiden Spalten wurde der Mittelwert und die Standardabweichung (Std. Abw.) ermittelt. In Klammern ist hinter der Standardabweichung noch der Wert für den Standardfehler vom Mittelwert (Std.Abw. / $\sqrt{\text{Anzahl der Werte}}$) angegeben.

Messung Nr. 1

Einstellung (beidseitig): H C N = 0 Grad
Bennett-Winkel = 0 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	1	+1	2	+2	0	0	0	0
SAM	2	+2	3	+3	3	+3	2	+2
WHIP-MIX	0	0	1	+1	0	0	1	+1
Mittelwert	1	+1	2	+2	1	+1	1	+1
Std. Abw.	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	1,7	(1,0)	1,0	(0,6)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	0	0	1	+1	1	+1	1	+1
SAM	0	0	0	0	2	+2	3	+3
WHIP-MIX	0	0	2	+2	0	0	2	+2
Mittelwert	0	+1	1	+1	1	+1	2	+2
Std. Abw.	0,0	(0,0)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)

Messung Nr. 2

Einstellung (beidseitig): H C N = 0 Grad
Bennett-Winkel = 10 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	2	+2	2	+2	10	0	11	+1
SAM	2	+2	3	+3	9	-1	13	+3
WHIP-MIX	2	+2	1	+1	8	-2	9	-1
Mittelwert	2	+2	2	+2	9	-1	11	+1
Std. Abw.	0,0	(0,0)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	2,0	(1,2)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	2	+2	3	+3	11	+1	10	0
SAM	3	+3	2	+2	9	-1	10	0
WHIP-MIX	1	+1	1	+1	13	+3	10	0
Mittelwert	2	+2	2	+2	11	+1	10	0
Std. Abw.	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	2,0	(1,2)	0,0	(0,0)

Messung Nr. 3

Einstellung (beidseitig): H C N = 30 Grad
Bennett-Winkel = 0 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	30	0	29	-1	0	0	0	0
SAM	33	+3	33	+3	3	+3	0	0
WHIP-MIX	33	+3	31	+1	0	0	0	0
Mittelwert	32	+2	31	+1	1	+1	0	0
Std. Abw.	1,7	(1,0)	2,0	(1,2)	1,7	(1,0)	0,0	(0,0)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	27	-3	29	-1	2	+2	0	0
SAM	28	-2	30	0	2	+2	3	+3
WHIP-MIX	32	+2	31	+1	2	+2	0	0
Mittelwert	29	-1	30	0	2	+2	1	+1
Std. Abw.	2,7	(1,5)	1,0	(0,6)	0,0	(0,0)	1,7	(1,0)

Messung Nr. 4

Einstellung (beidseitig): H C N = 30 Grad
Bennett-Winkel = 20 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	31	+1	31	+1	20	0	21	+1
SAM	31	+1	32	+2	18	-2	23	+3
WHIP-MIX	31	+1	30	0	19	-1	19	-1
Mittelwert	31	+1	31	+1	19	-1	21	+1
Std. Abw.	0,0	(0,0)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	2,0	(1,2)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	30	0	30	0	20	0	19	-1
SAM	31	+1	29	-1	20	0	17	-3
WHIP-MIX	29	-1	31	+1	20	0	21	+1
Mittelwert	30	0	30	0	20	0	19	-1
Std. Abw.	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	0,0	(0,0)	2,0	(1,2)

Messung Nr. 5

Einstellung (beidseitig): H C N = 60 Grad
Bennett-Winkel = 0 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	61	+1	59	-1	0	0	1	+1
SAM	63	+3	58	-2	0	0	2	+2
WHIP-MIX	62	+2	60	0	0	0	0	0
Mittelwert	62	+2	59	-1	0	0	1	+1
Std. Abw.	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	0,0	(0,0)	1,0	(0,6)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	62	+2	60	0	1	+1	0	0
SAM	59	-1	58	-2	2	+2	3	+3
WHIP-MIX	62	+2	59	-1	0	0	0	0
Mittelwert	61	+1	59	-1	1	+1	1	+1
Std. Abw.	1,7	(1,0)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	1,7	(1,0)

Messung Nr. 6

Einstellung (beidseitig): H C N = 60 Grad
Bennett-Winkel = 30 Grad

1. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	61	+1	62	+2	30	0	28	-2
SAM	63	+3	62	+2	33	+3	32	+2
WHIP-MIX	62	+2	62	+2	30	0	27	-3
Mittelwert	62	+2	62	+2	31	+1	29	-1
Std. Abw.	1,0	(0,6)	0,0	(0,0)	1,7	(1,0)	2,7	(1,5)

2. Einartikulierungsversion

Winkel	H C N				Bennett - Winkel			
	Rechts		Links		Rechts		Links	
DENTATUS	60	0	61	+1	29	-1	28	-2
SAM	60	0	62	+2	30	0	27	-3
WHIP-MIX	60	0	60	0	31	+1	29	-1
Mittelwert	60	0	61	+1	30	0	28	+2
Std. Abw.	0,0	(0,0)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)	1,0	(0,6)

6.2.7. Statistische Auswertung der Ergebnisse

An drei Artikulatoren (DENTATUS, SAM, WHIP-MIX) wurden 6 Messungen an jeweils 2 Einartikulierungsversionen durchgeführt. Hierbei wurden die HCN- und Bennettwinkel beidseitig nach Tabelle 1 (siehe 6.1.5.) programmiert.
Wir haben somit zusammen 36 Einzelregistrierungen mit beidseitig gleichen HCN- und Bennett-Winkeln aufgezeichnet.
Die maximale Abweichung bei allen Messungen betrug 3 Grad.
Die jeweils 72 HCN- und Bennett-Winkel-Angaben des ECRS zeigten folgende Übereinstimmung mit den Artikulatoreinstellungen:

Tabelle 6

Abweichung (in Grad) + oder -	HCN- Anzahl	HCN- in %	Bennett- Anzahl	Bennett- in %
0	16	22	29	40
1	24	34	18	25
2	22	30	13	18
3	10	14	12	17

Die mittlere Abweichung der ECRS-Werte von den Artikulatoreinstellungen betrug bei den
HCN-Winkeln = + 0,92 Grad (Std. Abw. = 1,06)
Bennett-Winkeln = + 0,58 Grad (Std. Abw. = 0,93)

Die mittlere Standardabweichung der ECRS-Werte betrug bei
HCN-Winkeln = + 0,96 Grad
Bennett-Winkeln = + 1,18 Grad

Die beste Übereinstimmung mit den ECRS-Ergebnissen zeigte der DENTATUS-Artikulator, gefolgt vom WHIP-MIX und SAM. p

6.3. Registrierung am Probanden

Hierbei sollte die klinischen Einsatzmöglichkeiten des ECRS an einem Probanden aufgezeigt werden. Quantitative Analysen und Interpretationen der Registrierergebnisse waren nicht vorgesehen. Es wurden folgende Unterkieferbewegungen mehrmals registriert:

- Öffnungs- und Schließbewegungen (Scharnierbewegung)
- Grenzbewegungen (Protrusion, beidseitige Mediotrusion)
- Stützstiftgeführte Grenzbewegungen (Pfeilwinkel)
- Kaubewegungen (Einzelzyklus, mehrere Zyklen, beidseitig)
- Posselt-Diagramm

6.3.1. Proband

Es handelte sich um einen 26 jährigen Kollegen. Sein Gebiß war vollbezahnt und wies in allen 4 Quadranten nur wenige kleine, okklusale Füllungen auf. Subjektive Beschwerden und pathologische Erscheinungen an der Kaumuskulatur und an den Kiefergelenken lagen nicht vor.

6.3.2. Vorbereitende Maßnahmen

Nach Abdrucknahme des Ober- und Unterkiefers mit Alginat, Herstellung von Situationsmodellen aus Superhartgips und Anfertigung der paraokklusären Befestigungsträgern erfolgte die Einprobe der Schienen am Probanden. Alle störenden Okklusions- und Artikulationshindernisse wurden im Munde des Probanden entfernt. Danach erfolgte die Überprüfung des genauen, exakt reponierbaren Sitzes der beiden Schienen. Anschließend wurden die beiden Befestigungsträger bei relativer Trockenlegung an den Ober- bzw. Unterkieferzahnreihen angeklebt. Nach 2 Minuten Trocknungszeit wurde die Koordinatenbestimmungsmechanik am Oberkieferträger be-

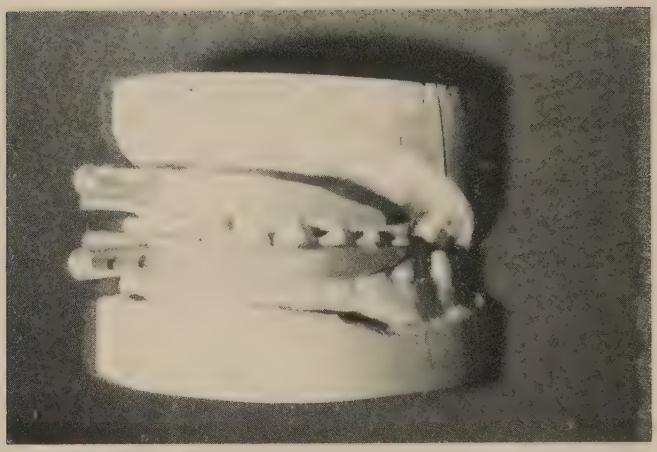


Abb.18: Befestigungsträger auf dem Modell hergestellt

festigt und die Betriebsbereitschaft des Systems überprüft. Hierauf erfolgte die Bestimmung und Abspeicherung der Koordinaten des Infraorbitalpunktes.

6.3.3. Scharnierachsen- und Kondylenlokalisation

Die Bestimmung der Raumkoordinaten der beiden Kondylendrehzentren geschah durch Abspeichern und Ausrechnen von 5 nacheinander registrierten, leicht geführten Öffnungs- und Schließbewegungen nach dem bereits unter 4.8. beschriebenen mathematischen Verfahren. Die maximale Öffnungsbewegung betrug 2 cm.
Die horizontalen Koordinatenkomponenten wurden rechnerisch anhand mehrerer beidseitiger Lateralbewegungen mittels 'Sukzessiver Approximation' bestimmt.

6.3.4. Durchführung der Registrierungen

Nachfahren und Abspeichern der folgenden Bewegungsmuster:

1. Öffnungs- und Schließbewegung (Rotationsbewegung)

Ausgangsposition (Max. Interkuspitation)
I
** START **
I
Langsame Öffnungsbewegung
I
Maximale Öffnung (5 cm)
I
Langsame Schließbewegung
I
Max. Interkuspitation
I
** ENDE **

2. Grundregistrierung der Grenzbewegungen bei freier Unterkieferbewegung unter Zahnkontakt:

Ausgangsposition (Max. Interkuspitation)
I
** START **
I
Max. Protrusionsbewegung
I
Rückführung in die Ausgangsposition
I
Rechtslateralbewegung
I
Rückführung in die Ausgangsposition
I
Linkslateralbewegung

Rückführung in die Ausgangsposition

I

** ENDE **

3. Nach Aufnahme eines Bolus (Gummibärchen) erfolgte, ausgehend von der maximalen Interkuspitation, eine rechts- bzw. linksseitige mehrmalige Kaubewegung. Hierbei wurde auf die gleichmäßige Ausführung des Kauaktes geachtet.

4. Grundregistrierung (Pfeilwinkel) unter Ausschaltung jeglicher Zahnführung mit Hilfe eines starren Stützstiftes: Wir verwendeten hierfür den von KLEINROCK angegebenen FUNKTIOGRAPHEN (Fa. Ivoclar). Nach gleichzeitiger intraoraler Montage der Gaumenplatte mit Stützstift und der lingualen Schreibplatte erfolgte das Nachfahren des Grenzbewegungsmusters unter dauerndem Kontakt des arretierten Stiftes auf der Schreibplatte. Alle Bewegungen wurden unter leichter retraler Führung aus der habituellen Unterkieferposition (IKP) durchgeführt.

5. Aufzeichnen des Posselt-Diagramms (30):

Ausgangsposition (Max. Interkuspitation)

I

** START **

I

Max. Protrusionsbewegung unter Zahnkontakt

I

Langsame, geradlinige Öffnungsbewegung

I

Maximal geöffnete Position

I

Langsame Schließbewegung

I

Zurückgleiten in die Ausgangsposition

I

** ENDE **

Nach jeder einzelnen Registrierung wurden die zwischenzeitlich im Rechner gespeicherten Daten auf Diskette transferiert um sie jederzeit wieder verfügbar zu haben. Dieser Vorgang dauerte maximal 30 Sekunden, so daß der nächste Registriervorgang ohne nennenswerte Verzögerung sofort angeschlossen werden konnte.

6.3.5. Entfernung der Bewegungsmeßmechanik und der Befestigungsträger

Nach Lösen der zwei Arretierungsschrauben wurde die Meßmechanik abmontiert und die paraokklusären Schienen durch einen kräftigen Ruck entfernt. Anschließend reinigten wir die buccalen Zahnflächen von Sekundenkleberresten.
Um die Koordinatenbestimmung der später projizierten Unterkieferpunkte (Inzisalpunkt und Zahn 37) durchführen zu können wurde der untere Befestigungsträger auf dem Unterkiefer-Situationsmodell mit Sekundenkleber angeklebt. Die Schiene wurde in identischer Position fixiert.

6.3.6. Bestimmung der Koordinaten der Unterkieferpunkte (Inzisalpunkt, Zahn 37)

Die Koordinatenbestimmungmechanik wurde auf den am Situationsmodell angeklebten Befestigungsträger gesteckt und arretiert. Nach Aufsetzen des stylusförmigen Zeigers auf den zu projizierenden Punkt (Inzisalpunkt bzw. mesiobuccaler Höcker des Zahnes 37) konnten auf Tastendruck die Koordinaten der beiden Punkte im Rechner bestimmt und zwecks späterer Projektion abgespeichert werden. Darüberhinaus bestand die Möglichkeit noch weitere, zusätzliche Unterkieferpunkte zu bestimmen und abzuspeichern.
Bei den Arcon-Artikulatoren (SAM, WHIP-MIX) konnten, ausgehend von den einartikulierten Unterkiefermodellen, sogar die Kondylenmittelpunkte bestimmt werden.

6.3.7. Auswertung und graphische Darstellung

Da alle Daten auf Disketten gespeichert waren, konnte die eigentliche Ausrechnung der räumlichen Unterkieferbewegung zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.
Zuerst rechnete der Computer die allgemeine räumliche Bewegungsbahn des Unterkiefers während der verschiedenen Registrierzyklen in Form von 450 Koordinatentripeln aus. Dieser Vorgang dauerte pro Zyklus nicht mehr als 5 Minuten. Anschließend wurden diese Unterkieferbewegungsbahnen auf die 4 Unterkieferpunkte:

- rechter Kondylus
- linker Kondylus
- Inzisalpunkt
- Zahn 37

mathematisch projiziert. Voraussetzung für die Darstellung der Kondylenbahnen war die Bestimmung der Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE), d.h. der Koordinaten der beiden Kondylenmittelpunkte und des Infraorbitalpunktes. Das Kondylenlokalisationsprogramm mit seinen diversen Unterroutinen berechnete uns diese Koordinatentripel.
Während der Projektion konnten die 450 Punkte der verschiedenen Bewegungsbahnen in ihrer zeitlichen Abfolge auf dem Grafikbildschirm genau verfolgt werden. Anhand der am oberen, rechten Bildrand eingeblendeten Zahl ließen sich die einzelnen Bewegungsabschnitte segmentieren.
Es war möglich, die grafische Darstellung durch Eingabe eines entsprechenden Parameters bis Faktor 3 zu vergrößern. Der gesamte Bewegungsablauf (also 450 Punkte) oder aber einzelne Bewegungssegmente (z.B. von Punkt 120 bis Punkt 310) konnten dargestellt werden. Ebenso ließen sich mehrere verschiedene Segmente von unterschiedlichen Registrierungen übereinander projizieren.
Bei Bedarf wurde auf Tastendruck ein Grafikausdruck des auf dem Rechnerbildschirm dargestellten Bildes erstellt.
Abschließend wurden die Kondylen- und Gelenkbahnparameter in Form eines Registrierprotokolls ausgedruckt.

6.3.8. Bestimmung der Vergleichswerte des Probanden mittels Axiographie

Wir lokalisierten bei dem selben Probanden mit einem modifizierten AXIOGRAPH / Fa. SAM (ohne laterale Meßuhren) die Scharnierachse und zeichneteten beidseitig die Lateral- und Protrusionsbewegungsbahn auf. Anschließend wurde die Scharnierachse-Orbital-Ebene auf den Registrierplatten eingezeichnet. Mit Hilfe eines ALMORE - Übertragungsbesteckes erfolgte die Einartikulierung des Splitcast - Oberkiefermodells in den DENTATUS Artikulator. Die beidseitige Horizontale-Condylenbahn-Neigung (HCN) wurde durch einen Protrusionsbiß bestimmt und am Artikulator eingestellt.
Für die genaue räumliche Vermessung der schädelbezüglichen Ausrichtung des einartikulierten Oberkiefermodells verwendeten wir die gleiche Meßvorrichtung wie beim bereits oben beschriebenen Artikulatorenvergleich (siehe 6.1.6.). Mit Hilfe dieses Meßgestells konnten die Raumkoordinaten der beiden Kondylenmittelpunkte in bezug auf das Koordinatensystem der Bewegungsmeßmechanik relativ genau bestimmt werden.
Die so ermittelten Werte konnten nun direkt mit den ECRS-Werten verglichen werden.

6.3.9. Vergleich der ECRS-Ergebnisse mit den Axiographie-Ergebnissen

Die graphische ECRS-Darstellung der Kondylenbahnen einer Grundregistrierung wurde im Verhältnis 1:1, also in natürlicher Größe, ausgedruckt. Da die Bewegungsbahnen beim ECRS bereits zur Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE) ausgerichtet waren, konnte nach Einzeichnen der Scharnierachse-Orbital-Ebene in die Aufzeichnungen der Axiographie ein metrischer Vergleich der beiden Winkelpaare erfolgen.

6.4. Ergebnisse der Registrierungen am Probanden

6.4.1. Kondylenlokalisation

Die Abb.19 zeigt das vom ECRS erstellte Registrierprotokoll Es entspricht im Aufbau dem des Artikulatorenvergleiches. Zur Interpretation der Kondylenlokalisation sei auf die Abhandlung über das mathematische Modell verwiesen (4.8.). Zu beachten ist auch die Angabe zum Radius der Rotation, d.h. der kürzeste sagittale Abstand zwischen Scharnierachse und Mittelpunkt des oberen Teils der Bewegungsmeßmechanik.

ECRS-Registrierprotokoll: **Nr.: 82/P04**

Patientenname: Clifford Chan **Geb.-Datum: 02.04.55**

Datum der Registrierung : 13.06.82 **Behandler: A.L.**

Bemerkungen: Grundregistrierung zahngeführt
Protrusion - Lateralbewegung rechts / links

Kondylen-Lokalisation:

Radius der Rotation = 132,1 mm

Koordinaten	Rechts	Links	(in mm)
Horizontal (X)	- 58,6	53,8	
Sagittal (Y)	-135,5	-130,1	
Vertikal (Z)	- 16,9	- 23,2	

Interkondylarabstand = 112,5 mm

HCN	56,2	50,1	(in Grad)
Bennett-Winkel	18,9	20,8	

Winkel zwischen Mechanikebene und SOE = 5,5 Grad

Abb.19: ECRS-Registrierprotokoll beim Probanden

Die mit Hilfe des ECRS aus mehreren Kondylenlokalisationen errechneten und anschließend gemittelten Kondylenkoordinaten des Probanden wurden mit den durch Axiographie ermittelten Werten vorgenommen. Das Meßverfahren zur Bestimmung der Kondylenkoordinaten mittels Axiographie ist unter 6.1.6. genau beschrieben.
Die Differenzen der Ergebnisse des ECRS bzw. Axiographen bei der Lokalisation des rechten und linken Kondylusdrehzentrums sind in Tabelle 7 aufgeführt:

Tabelle 7

System	Rechter Kondylus			Linker Kondylus		
	XR	YR	ZR	XL	YL	ZL
ECRS	-57,5	-134,5	-17,2	58,8	-134,0	-23,5
Axiograph	-76,3	-132,0	-17,8	78,9	-132,5	-22,1
Differenz	18,8	2,5	0,6	20,1	1,5	1,4

(Angaben in Millimeter)

Die Differenzen von bis zu 2 cm bei den beiden horizontalen Kondylenkoordinaten XR und XL erklären sich dadurch, daß im Gegensatz zur Axiographie, bei der der Hautdurchtrittspunkt der Scharnierachse bestimmt wird, beim ECRS die Kondylendrehzentren errechnet werden. Diese liegen um einen individuellen Betrag (ca. 1-3 cm) medialer als der Hautpunkt bei der Axiographie.
Diese Ergebnisse sind nicht repräsentativ, da die Scharnierachsenlokalisation auf dem Axiograph-System nur einmal durchgeführt wurde. Sie bestätigen aber die prinzipielle, in den Werten annähernd übereinstimmende Vergleichbarkeit beider Verfahren.

6.4.2. Darstellung der Registrierungen

Im folgenden werden die am Probanden registrierten, räumlichen Bewegungen jeweils für den rechten und linken Kondylus sowie für den Inzisalpunkt dargestellt.
Zur Veranschaulichung der doch relativ schwierig zu verstehenden, orthogonalen Projektion der räumlichen Kondylenbewegungen beachte man wiederrum folgendes Schema (Abb.20):

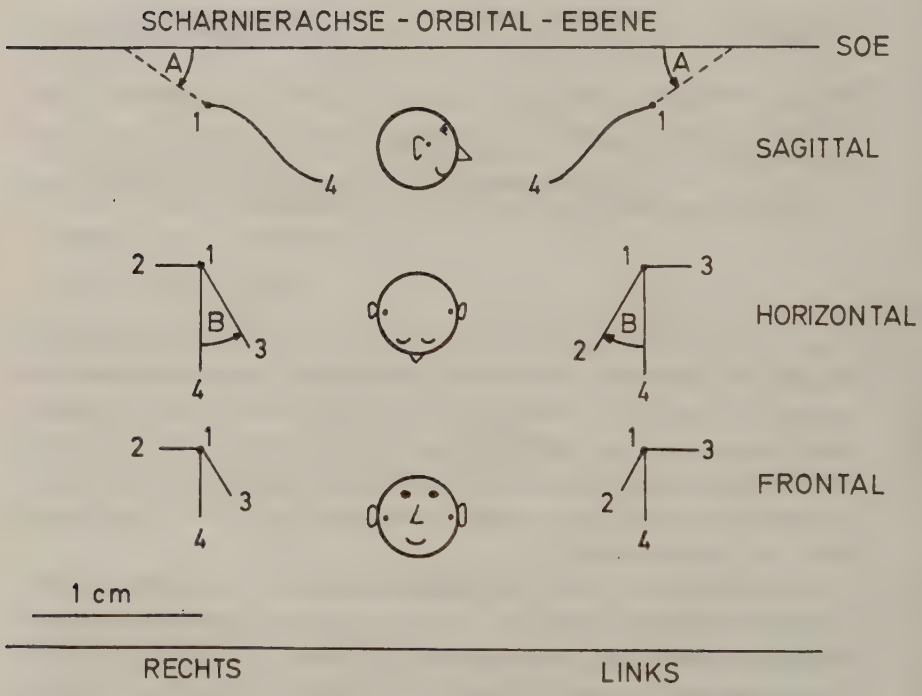


Abb.20: Orthogonale Projektion der Kondylenbewegungen an Probanden (schematisiert)

Die Darstellung der Kondylenbewegung (rechte bzw. linke Seite) verhält sich identisch zu den Verhältnissen beim frontalen, sagittalen bzw. kranialen Betrachten des Probanden.
Ähnlich der bereits beim Arikulator aufgeführten Interpretationshinweise (siehe 6.2.4.) gilt auch bei einer Grundregistrierung am Probanden folgende Bezeichnung der Bewegungssegmente:

1 = Maximale Interkuspitationsposition (IKP)
2 = Rechte Lateralbewegungsbahn
3 = Linke Lateralbewegungsbahn
4 = Maximale Protrusionsbahn
A = Horizontale Condylenbahn Neigung (HCN)
B = Bennett - Winkel

Die Bewegungen des Unterkiefers, bezogen auf den Inzisalpunkt, sollen in einer zusätzlichen Schemazeichnung beschrieben werden (Abb.21).
Das Schema der orthogonalen Projektion der Bewegung des Inzisalpunktes stimmt in der Bezeichnung der Bewegungssegmente mit dem Schema der Kondylenbewegung überein. Beide Schemata sind somit identisch bezeichnet. Es können die jeweils korrespondierenden Bewegungen leicht miteinander verglichen werden.
Die schematische Darstellung der Bewegung des Inzisalpunktes zeigt darüberhinaus noch ein zusätzliches Bewegungssegment:

5 = Öffnungs- und Schließbewegung
(Scharnierachsenbewegung der Kondylen = 1)

Wie schon im Kapitel über den Artikulatorenversuch erklärt, gibt der Balken am linken, unteren Bildrand die Maßstabsskalierung an. Die Länge des Strichs entspricht genau 10 mm realer Wegstrecke.

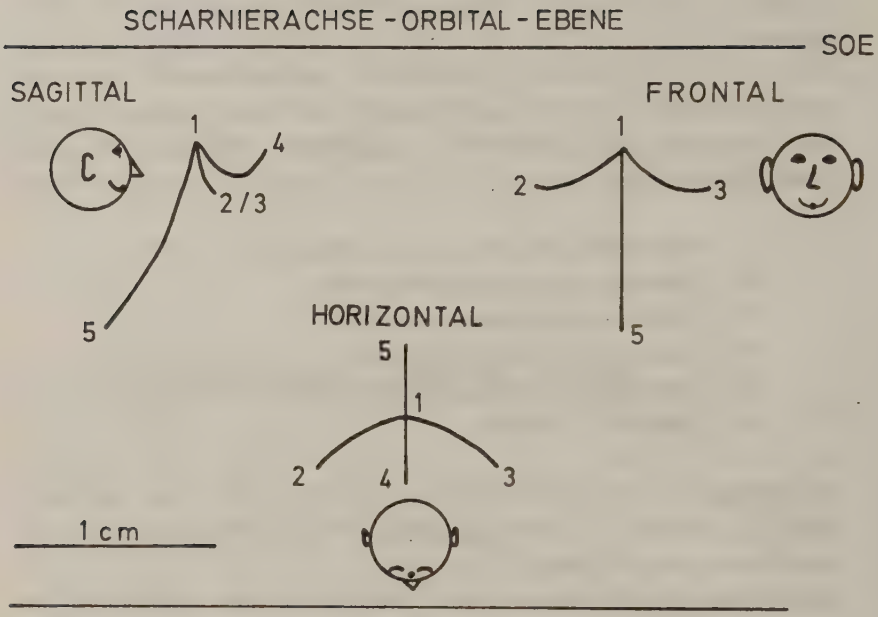
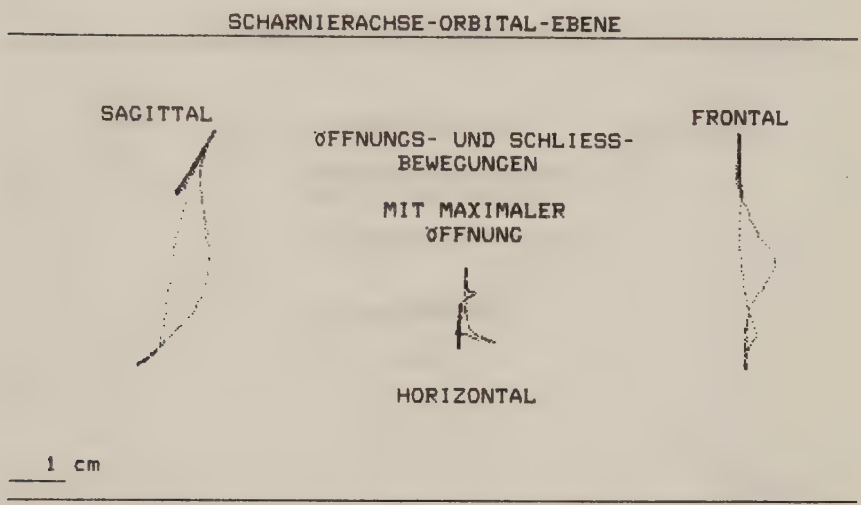


Abb.21: Orthogonale Projektion der Bewegung des Inzisalpunktes an Probanden (schematisiert)

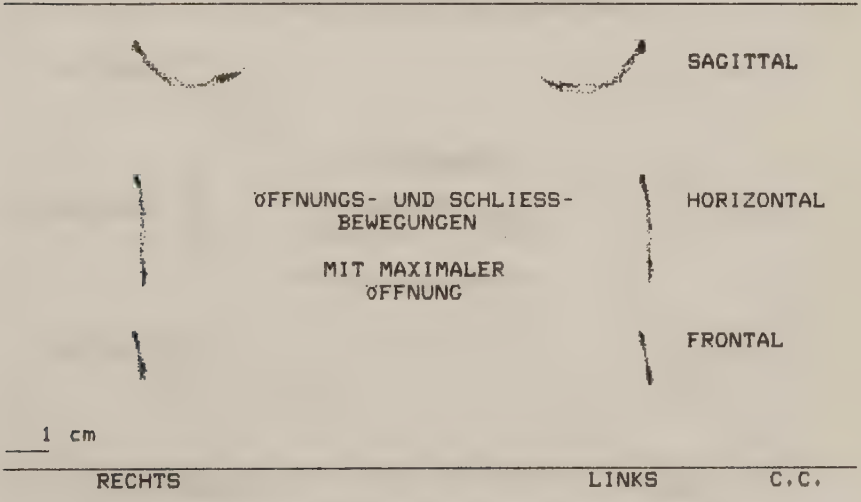
Im folgenden sollen nun die verschiedenen Unterkieferbewegungszyklen als ECRS-Graphikausdrucke dargestellt werden. Der Bewegungsablauf der beiden Kondylen und des Inzisalpunktes wurde orthogonal auf die 3 Raumebenen projiziert. Die entsprechenden Projektionen sind untereinander abgebildet. Die 5 verschiedenen Registrierungen wurden mit Ausnahme der Kaubewegungen bei 30 Hz Erfassungsfrequenz aufgezeichnet. Bei den Kaubewegungen wurde die maximale Frequenz von 60 Hz gewählt.

1. Öffnungs- und Schließbewegungen (Rotationsbewegungen) mit maximaler Öffnung



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES INZISALPUNKTES

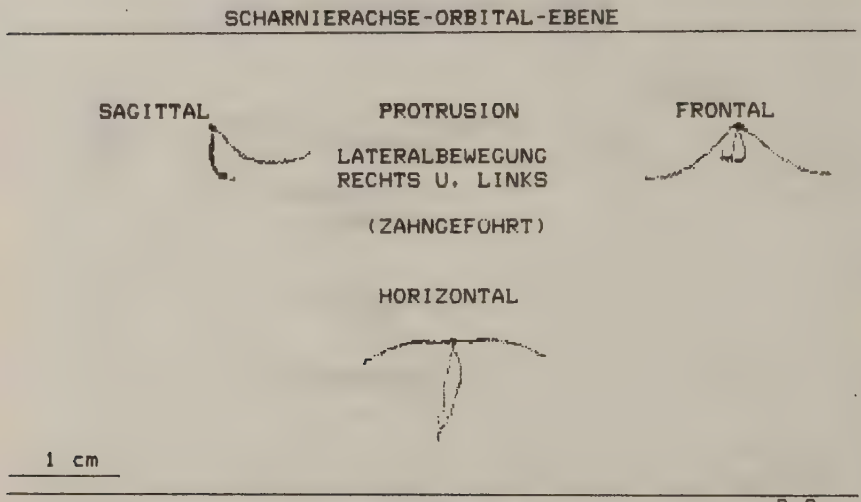
Abb.22:



ORTHOGONALE PROJEKTION DER KONDYLENBEWEGUNG

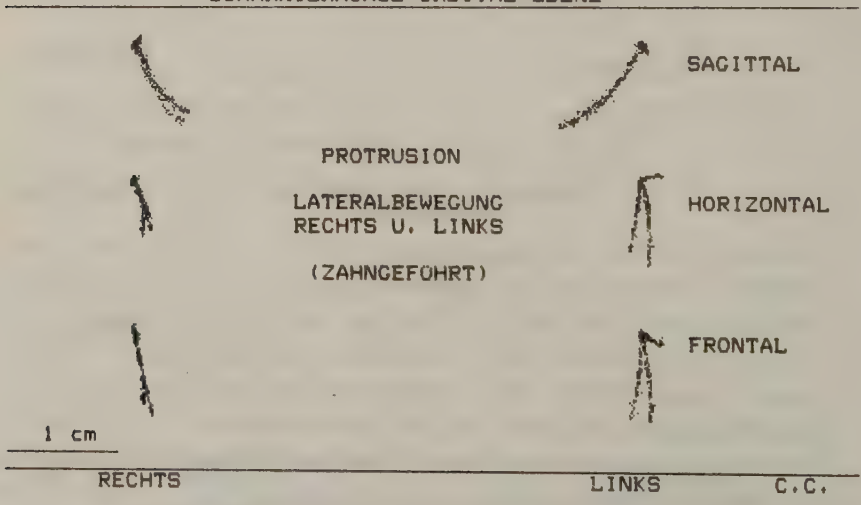
Abb.23:

2. Grundregistrierung der Grenzbewegungen unter Zahnkontakt
(Protrusion, Mediotrusion Rechts/Links)



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES INZISALPUNKTES

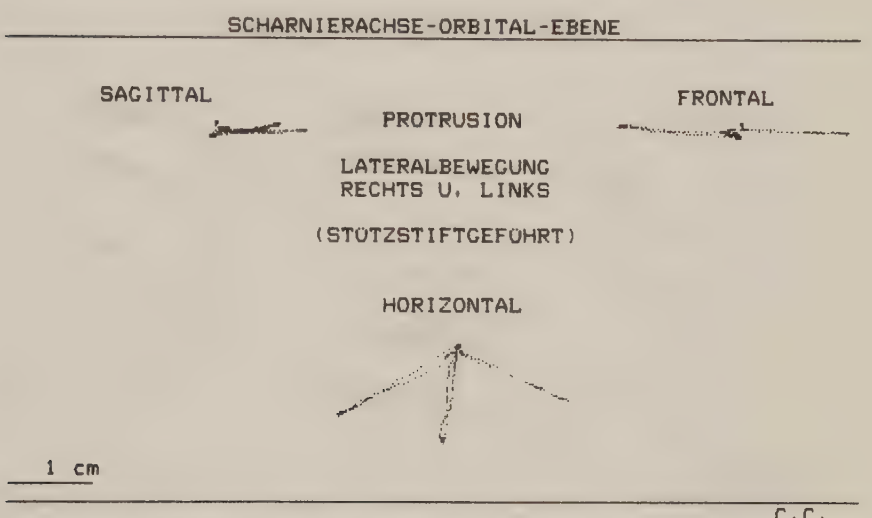
Abb.24:



ORTHOGONALE PROJEKTION DER KONDYLENBEWEGUNG

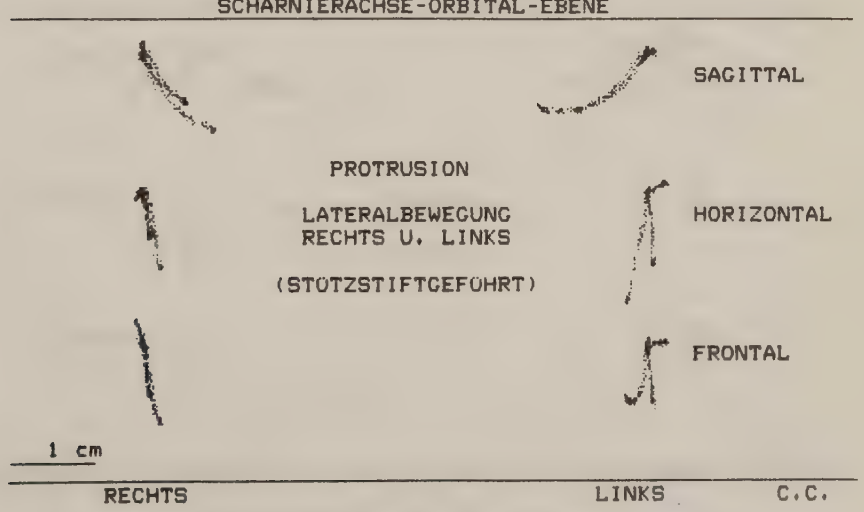
Abb.25:

3. Grundregistrierung der Grenzbewegungen unter Stützstift-führung (Protrusion, Mediotrusion Rechts/Links)



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES INZISALPUNKTES

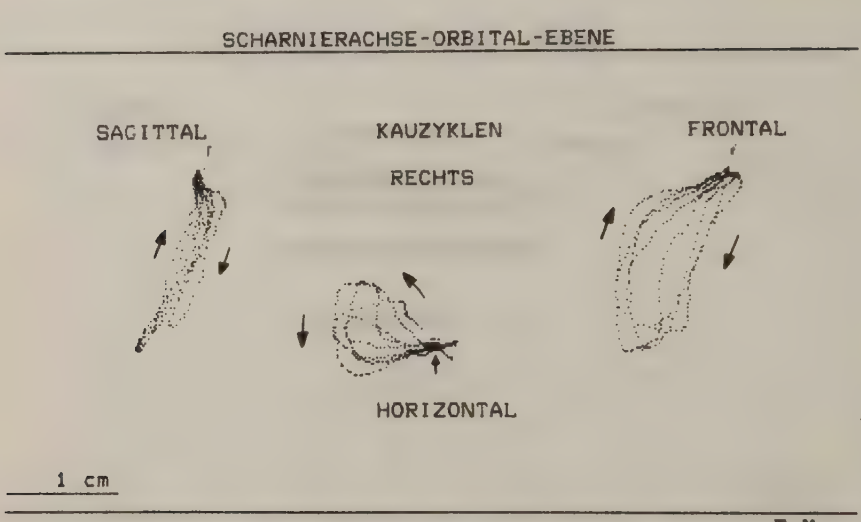
Abb.26:



ORTHOGONALE PROJEKTION DER KONDYLENBEWEGUNG

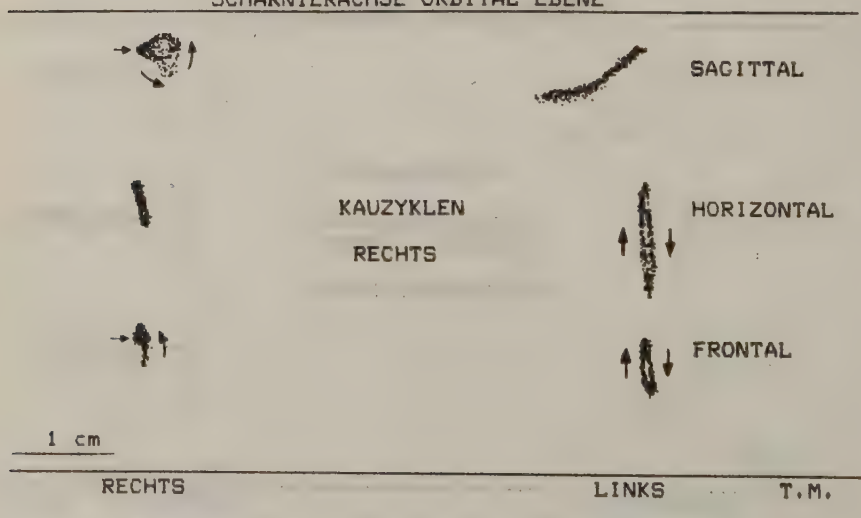
Abb.27:

4. Rechtsseitige Kaubewegungen mit Bolus
(4 aufeinanderfolgende Kauzyklen)



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES INZISALPUNKTES

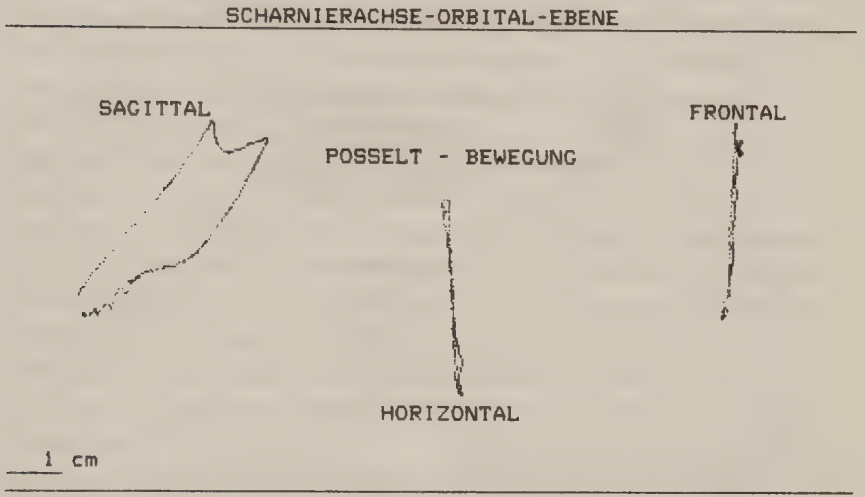
Abb.28:



ORTHOGONALE PROJEKTION DER KONDYLENBEWEGUNG

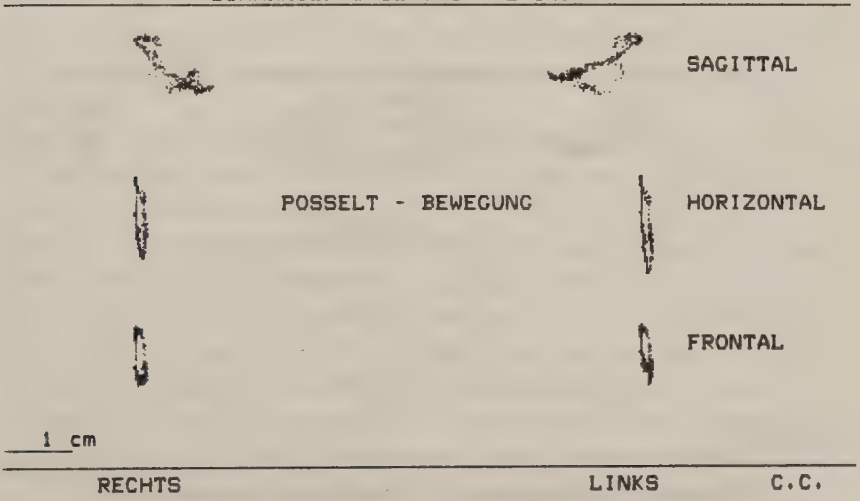
Abb.29:

5. Posselt'sches Bewegungsdiagramm ("Posselt'sche Banane")
(mehrphasiger Öffnungs- und Schließbewegungszyklus)



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES INZISALPUNKTES

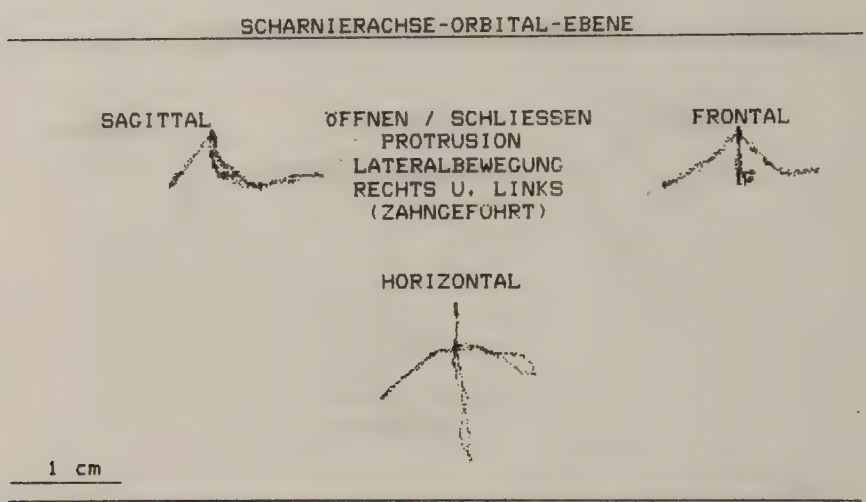
Abb.30:



ORTHOGONALE PROJEKTION DER KONDYLENBEWEGUNG

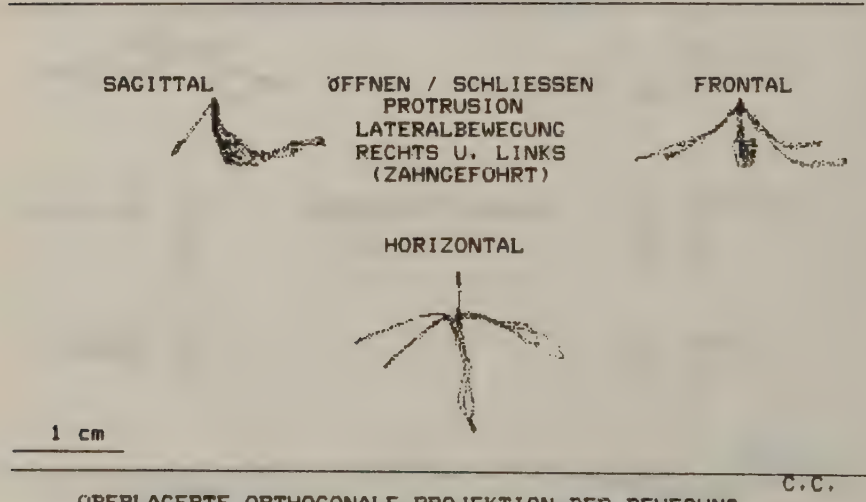
Abb.31:

6.4.3. Vergleichende Projektion von Inzisalpunkt und Zahn 37 (mesiobuccaler Höcker) bei einer Grundregistrierung



ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DES ZAHNES 37
(Identische Registrierung wie auf S.82)

Abb.32:



OBERLAGERTE ORTHOGONALE PROJEKTION DER BEWEGUNG DER ZÄHNE 31,37 (Registrierung S.82)

Abb.33:

7. Diskussion

Ein Ziel dieser Untersuchung bestand darin, einige durch das ECRS errechnete Gelenkbahnparameter, im Rahmen eines Artikulatorenvergleiches, gegenüberzustellen.
Hierbei wurden die ECRS-Ergebnisse im Hinblick auf ihre Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Störanfälligkeit überprüft.
Weiterhin sollte das System auf die spätere Verwendbarkeit in der instrumentellen Funktionsanalyse untersucht werden. Dieser Zielsetzung dienten die 5 verschiedenen Registrierungen am Probanden.
Hauptpunkt war jedoch die Vorstellung eines völlig neuartigen Registriersystems für die räumliche Unterkieferbewegung.

7.1. Beurteilung der Ergebnisse

Artikulatorenversuch:

Die von dem ECRS ermittelten Werte zeigten eine gute Übereinstimmung mit den wirklichen, abgemessenen Artikulatorwerten.
Die geringen Abweichungen im Millimeterbereich bei der Kondylenlokalisation lassen sich sicherlich nicht nur auf Meß- und Rechenungenauigkeit des ECRS zurückführen. Vielmehr dürften Meßfehler bei der Referenzbestimmung der Raumkoordinaten der Kondylenmittelpunkte mittels des Meßgestells und mechanischer Meßinstrumente für die aufgetretenen Differenzen verantwortlich zu machen sein. Zudem wurde die mechanische Referenz-Kondylenlokalisation nur an einem Artikulator (DENTATUS) durchgeführt. Eine repräsentative, statistische Auswertung der Übereinstimmung der ECRS-Werte bei der Kondylenlokalisation war deshalb nicht sinnvoll. Vorversuche zeigten jedoch eine eindeutige Repro-

duzierbarkeit in der Kondylenlokalisation am Artikulator, sodaß wir auf eine Einbeziehung dieser Ergebnisse in diese Arbeit verzichteten. Da die 3 Artikulatoren (DENTATUS, SAM und WHIP-MIX) die gleichen Interkondylarabstände aufwiesen, konnte dennoch eine Mittelung der ECRS - Werte bei der Kondylenlokalisation vorgenommen werden. (siehe Tabelle 3) Aufgrund der Gesichtbogenübertragung der Referenzmodelle vom DENTATUS-Artikulator in den SAM und WHIP-MIX wurden die Referenzkoordinaten der Kondylenmittelpunkte für den SAM und WHIP-MIX explizit nicht bestimmt, sondern mit den beim DENTATUS-Artikulator gemessenen Werten gleichgesetzt. Wir haben nur die Einartikulierung des Oberkiefermodells am DENTATUS-Artikulator explizit nachgemessen.
Die in der Tabelle 3 aufgeführten Differenzen von bis zu $\pm$2 mm könnten somit auch durch die Gesichtbogenübertragung bei der Einartikulierung der Referenzmodelle in die 2 Artikulatoren entstanden sein.
Weitere Fehlermöglichkeiten lagen in einer manuell unruhigen Führung während der Rotationsbewegungen.
Die Errechnung des Interkondylarabstandes durch das ECRS erfolgte anhand der ermittelten Raumkoordinaten der beiden Kondylendrehzentren. Aufgrund des direkten mathematischen Zusammenhangs erübrigte sich eine gesonderte Beurteilung der Differenzen in Tabelle 4.

Die vom ECRS ermittelten Längen der Kondylen - Bewegungsbahnen war ein Maß für die Linearität der geometrischen Abbildungsprojektionen. Sie war von der während der Registrierung tatsächlich durchgeführten Bewegung abhänig. Tabelle 5 zeigt sehr geringe Abweichungen (maximal -1 mm) zwischen den ECRS-Werten und den an den Artikulatoren abgemessenen tatsächlichen Längen. Diese Übereinstimmung ist besonders bemerkenswert, wenn man die Tatsache berücksichtigt, daß während der Registrierung keine sichere Kontrollmöglichkeit darüber bestand, ob der Experimentator wirklich den maximal möglichen Kondylenbahnweg bis zum Anschlag an dem Kondylargehäuse gefahren war.

Die Grafikausdrucke der Kondylenbahnen zeigen oftmals nicht ganz kontinuierlich durchgezogene Bewegungsbahnspuren. Diese Unterbrechungen sind durch die nur mittelschnelle Registrierfrequenz von 30 Hz begründet. Die unterschiedlich schnelle Durchführung der einzelnen Bewegungsabläufe zeigte sich in einer ungleichmäßigen Punkteverteilung auf den Bewegungsbahnen. Dennoch läßt sich der exakt lineare Verlauf der Kondylenbahnen bei Grenzbewegungen deutlich erkennen. Diese Tatsache weist auf die gute Linearität des ECRS hin. Die Bewegungsbahnen der Bennett'schen Lateralbewegungen verlaufen exakt parallel zur Scharnierachse-Orbital-Ebene (SOE). Auch dies ist ein Beweis für die Registriergenauigkeit des ECRS.

Schwerpunkt der Untersuchung war der Vergleich zwischen den tatsächlich an den Artikulatoren eingestellten Gelenkbahnparametern und den nach Registrierung durch das ECRS errechneten Werten. Hierbei ergab sich eine mittlere Abweichung bei den HCN-Winkeln von 0,92 Grad und bei den Bennett-Winkeln von 0,58 Grad. Keine der 72 Winkelangaben des ECRS wich mehr als $\pm$ 3 Grad vom dem am Artikulator eingestellten Wert ab.
Die hauptsächliche Ursache für diesen Fehler ist mit großer Sicherheit in der relativ ungenauen Skalierung und Einstellung der Winkelwerte an den Artikulatoren zu begründen. Dies mag auch der Grund für die artikulatorspezifische, unterschiedliche Übereinstimmung zwischen Artikulatoreinstellung und ECRS-Wert sein. Die Winkeljustierungen am DENTATUS-Artikulator ließen sich am eindeutigsten einstellen. Die Winkelskalierungen am WHIP-MIX zeigten v.a. bei der HCN die gröbste Rasterung, woraus sich relativ ungenaue Einstellungen mit entsprechenden Fehlern ergaben. Somit läßt sich wohl der größere Anteil der Abweichungen zwischen ECRS-Werten und Artikulatorjustierungen auf die nicht ganz korrekte manuelle Programmierung der Gelenkbahnparameter an den Artikulatoren zurückführen.

Registrierung am Probanden:

Die Zielsetzung der Registrierungen am Probanden lag in der Darstellung der einfachen Anwendbarkeit des ECRS in der intrumentellen Funktionsanalyse. Es sollten lediglich die vielseitigen Möglichkeiten des Systems beispielhaft aufgezeigt werden. Auf quantitative und qualitative Analysen und Interpretationen der einzelnen unter 6.4.2. dargestellten Bewegungskurven wurde bewußt verzichtet. Die typischen Charakteristika der Kurven sind aus Registrierungen mit anderen Systemen bekannt und erklären sich von selbst. Die volle interpretative Ausschöpfung aller Möglichkeiten des ECRS sollte Ziel weiterer Arbeiten sein.

Ein besonderer Problemkreis des ECRS lag und liegt in der mathematischen Lokalisation der Koordinaten der Kondylendrehzentren beim Probanden. Es muß an dieser Stelle deutlich gesagt werden, daß das Problem der sicheren, genauen Kondylenlokalisation noch nicht gelöst ist. Der in dieser Arbeit verwandte und beschriebene Algorithmus war auf eine einwandfreie Funktion am Artikulator ausgerichtet. Unter bestimmten Vorraussetzungen lieferte er aber auch am Probanden akzeptable Ergebnisse (siehe 6.4.1.).
Gemäß dem mathematischen Ansatz des Programms war eine reine Scharnierachsenbewegung (Rotation) während der Öffnungs- und Schließbewegung zwingend erforderlich. Jegliche initiale Translationen in cranialer, caudaler, medialer, lateraler, dorsaler und ventraler Richtung führten zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Somit läßt sich die hier verwendete Version des Kondylenlokalisationsprogramms nur bei einem kleinen Prozentsatz von Probanden zufriedenstellend verwenden. Dennoch zeigte sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung der ECRS-Werte mit den durch Axiographie bestimmten Kondylenkoordinaten bei unserem Probanden. Aufgrund der modularen Gesamtstruktur des Programms läßt sich die jetzige Lokalisationsroutine problemlos durch eine neukonzipierte, überarbeitete, leistungsfähigerere

Version ersetzen. Ein derartiges, bei allen Probanden verwendbares Programm wird allerdings erheblich umfangreicher und komplexer werden. Diese Tatsache wird sich vor allem nachteilig auf die benötigte Rechenzeit und die Größe des erforderlichen Arbeitsspeichers auswirken. Weiterhin müßte in diesem Zusammenhang geprüft werden, ob sich überhaupt eine zuverläßige Methode entwickeln läßt, die von mathematisch nicht kalkulierbaren Störfaktoren, wie z.B. der Verbiegung des Unterkieferkörpers während der Öffnungsbewegung, relativ unbeeinflußt korrekte Ergebnisse liefert.

Die Abhänigkeit der Kondylenbahnprojektion bei nicht korrekt bestimmter Scharnierachse wurde bereits von SÖRGEL (22) theoretisch näher untersucht. Das ECRS gestattet nun weitergehende praktische Untersuchungen, die auch die mathematisch nicht kalkulierbaren Störfaktoren zu berücksichtigen ermöglichen.

7.2. Fehlerbetrachtung

Versuche mit einem komplexen System wie dem des ECRS implizieren eine Fülle von theoretisch vorstellbaren Fehlermöglichkeiten. Diese genau zu analysieren, zu interpretieren und deren Relevanz eindeutig zu bestimmen, bedarf einer gesonderten Untersuchung.
Im folgenden werden einige dieser Fehlerquellen lediglich erwähnt:

1. Versuchsaufbau beim Artikulatorenvergleich

* Gesichtsbogenübertragung und Einartikulierung
* Befestigung der paraokkl. Schienen an den Gipsmodellen
* Exakte Reponierung der Befestigungsträger auf den Gipsmodellen in den anderen Artikulatoren
* Schichtdicke des Befestigungsklebers

Die bisher genannten Punkte verändern das ECRS-Ergebnis nicht, da die Vorrichtung unabhänig von der räumlichen Lage der Befestigungsträger die Kondylen korrekt lokalisiert.

* Artikulatoreinstellung
  (Strichskala beim HCN- und Bennett-Winkel)
* Genauigkeit der Strichskalen (Strichstärke)

2. E C R S

* Fehler der Einzelkomponenten

  - Meßmechanik (Abmessung der Strecken, Abstände, Winkel)
  - Drehpotentiometer (Auflösung, Linearität, Glätte)
  - Meßwerterfassung (Auflösung, Linearität, Temp. Drift, Eichung, Störanfälligkeit)
  - Computer (Rechengenauigkeit, Rundungsfehler)
  - Peripheriegeräte (Auflösung des Druckers bzw. Plotters)

* Eichung des Gesamtsystems (Vorgang, Vorrichtung)
* Mathematischer Ansatz (v.a. bei Kondylenlokalisation)
* Fehlertoleranz und -kompensation des Programms und des Rechners (Fehlerfortpflanzung)
* Schwingungen der Bewegungsmeßmechanik bei ruckartigen Unterkieferbewegungen
* Anfälligkeit der Elektronik (Netzstörungen)
* Meßwertübertragung zum Meßwerterfassungssystem

3. Versuchsablauf

* Mangelnde Fixierung der Meßmechanik am Befestigungsträger
* Ungenaue und unruhige Ausführung der Bewegungen durch den Experimentator
* Ungenaue Axiographie beim Probanden (Referenzwerte)
* Fehlerhafte Bedienung des ECRS

4. Versuchsauswertung beim Artikulatorenvergleich

* Ungenaue Bestimmung der Kondylenraumkoordinaten
* Ungenaue Festlegung der Winkelschenkel (HCN-, Bennett-)
* Fehlerhafte Messung der Winkel mit Winkelmesser

5. Proband

* Eventuelle Durchbiegung des Unterkieferkörpers bei bestimmten Bewegungen (z.B. maximale Öffnung)
* Verfälschung der Registrierung durch pathologisch große Auslenkung der Zähne, an denen die Befestigungsträger angeklebt sind
* Individuelle Eigenarten im Unterkieferbewegungsmuster, die bei der augenblicklichen Version des Kondylenlokalisationprogramms noch nicht berücksichtigt werden
* Nicht bestimmbare Scharnierachslokalisation

7.3. Ausblicke

Der Entwicklung des ECRS lag die Aufgabe zugrunde, ein System zu entwerfen, daß die pantographischen Verfahren in Leistungsfähigkeit, funktionsanalytischer Aussagekraft und Vielseitigkeit übertrifft.
Das System hat heute einen Entwicklungsstand erreicht, der eine klinische Anwendung zuläßt. Bis auf die genaue mathematische Lokalisation der Kondylenmittelpunkte beim Probanden können alle Probleme als gelöst angesehen werden. Eine hinreichend genaue, reproduzierbare und v.a. schnelle Kondylenlokalisation, die auch bei abnormen bzw. pathologischen Kiefergelenksverhältnisse befriedigende Ergebnisse liefert, macht die Verwendung eines leistungsfähigen Rechners mit den Programmiersprachen PASCAL oder FORTRAN erforderlich. Bei Verwendung eines modernen 16/32-Bit Rechners mit mindestens 512K-Byte Arbeitsspeicher und 10M-Byte Winchester-Festplatte, ließe sich zudem auch die Echtzeit-Darstellung (Real-Time) der räumlichen Unterkieferbewegung verwirklichen.
Die Erstellung der notwendigen mathematischen Routinen ist ein gesondertes Problem.

Darüberhinaus wären noch weitere technische Verbesserungen erstrebenswert, die die Handhabung und Benutzerfreundlichkeit des ECRS verbessern würden. Hierzu zählt v.a. die Verwendung von kleineren Drehpotentiometern bei der Bewegungsmeßmechanik. Der Bau eines zweiten Prototyps mit im Durchmesser 22 mm großen Drehpotentiometern und leichteren Mechanikteilen ist geplant. Das vorraussichtliche Gesamtgewicht beträgt dann unter 170 g.
Weiterhin soll die Verdrahtung der Drehpotentiometer kompakter gestaltet werden.

Angesichts der digitalen Abspeicherung der Unterkieferbewegungsmeßwerte bieten sich weitere, zusätzliche Systemkomponenten an. Rechnerseitig ist der Anschluß einer Kopierfräse

für individuelle Artikulatorgelenkblockeinsätze vorgesehen. Dies würde eine individuelle Ausgestaltung des Bewegungsraums beider Kondylen, ähnlich der LEE-Turbinenfrästechnik (32), ermöglichen.
Das ECRS Meßwerterfassungssystem ist für den Anschluß eines 7-Kanal Elektromyographieverstärkers vorgesehen. Ebenso wie die Potentiometerspannungen der Bewegungsmeßmechanik wird das EMG-Signal mit 12-Bit Auflösung digitalisiert und zur graphischen Darstellung und weiteren Berechnung an den Rechner übermittelt. Die gleichzeitige Erfassung von EMG-Potentialen der Unterkiefermuskulatur und der räumlichen Lage des Unterkiefers läßt funktionsanalytische Interpretationen bezüglich der Koordination zwischen Bewegungsablauf und elektrophysiologischen Vorgängen zu.
Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Koordinatenbestimmungsmechanik liegen in der Anwendung zur Vermessung von Ober- und Unterkiefermodellen . Eine kieferorthopädische Modellanalyse ist somit möglich.

8. Zusammenfassung

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit bestand darin, ein völlig neuartiges elektronisches, computergestütztes Unterkieferbewegungsregistriersystem (ECRS) zu beschreiben und dieses im Rahmen einer vergleichenden Untersuchung mit 3 Artikulatoren (DENTATUS, SAM, WHIP-MIX) zu testen.
Die besondere Leistung des ECRS liegt in der mathematischen dreidimensionalen Erfassung der Unterkieferbewegung, deren Projektion bezogen auf beliebig wählbare Unterkieferpunkte (Kondylen, Zähne), sowie der Möglichkeit der Lokalisation des Kondylendrehzentrums.
Die räumliche Ausrichtung zweier unterschiedlich in den Artikulator DENTATUS einartikulierter Referenzmodellsätze wurde mittels Gesichtsbogen identisch in die zwei anderen Artikulatoren übertragen. Mit diesen 2 Einartikulierungsversionen wurden bei jedem der drei Artikulatoren vergleichende ECRS-Registrierungen derart vorgenommen, daß die Gelenkbahnparamenter (Kondylenbahnneigung (HCN) und Bennett-Winkel) beidseitig am Artikulator in 6 Einstellungen variiert und mit den vom ECRS ermittelten Werten verglichen wurden. Bei jedem der drei Artikulatoren wurden somit 12 Einzelmeßreihen mit jeweils 2 HCN- und 2 Bennett-Winkelbestimmungen, d.h. insgesamt 48 Winkelmessungen, vorgenommen.
Im Mittel wichen die 144 ECRS-Werte von den Artikulatoreinstellungen bei den jeweils 72 HCN-Winkeln um +0,92 Grad und bei den Bennett-Winkeln um +0,58 Grad ab.
56% aller HCN-Messungen bewegten sich innerhalb einer Abweichung von $\pm$1 Grad. Bei den Bennett-Winkeln betrug der Prozentsatz sogar 65 %.
Exemplarisch wurde weiterhin bei jedem Artikulator eine Kondylenlokalisation vorgenommen. Die maximale Abweichung betrug in einem Fall 4 mm in sagittaler Richtung. Die mittlere Abweichung war nie größer als $\pm$ 2 mm.
Der Vergleich zwischen der tatsächlichen, konstruktionsbedingten Länge der Kondylenbewegungsbahnen und der durch

das ECRS ermittelten ergab eine maximale Differenz von 0,8 mm. Bei der Bestimmung des Interkondylarabstandes lag der maximale Differenzbetrag bei + 1,1 mm.
Die Registrierungen am Probänden sollten lediglich die Anwendbarkeit des Systems in der instrumentellen Funktionsanalyse dokumentieren.
Mit Hilfe dieses Systemes ist es möglich individuelle Parameter wie Kondylenbahnneigung, Bennett-Winkel, Immediate Side Shift und Lokalisation der Kondylendrehzentren am Probanden direkt zu registrieren und einen halbindividuellen Artikulator zu programmieren. Es ermöglicht darüberhinaus eine räumliche Darstellung beliebiger Unterkieferbewegungen bezogen auf beliebige Unterkieferpunkte. Auch die Dynamik (Geschwindigkeit, Beschleuningung und Dauer) der einzelnen Bewegungen läßt sich darstellen.

9. Mathematischer Anhang

Fortlaufende Projektion der Bewegung beliebiger Unterkieferpunkte (z.B. Kondylen, Inzisalpunkt, Zähne) mit Laufvariable i (i = 1-450) auf die 3 Raumebenen.

Die Koordinaten der Eckpunkte des Bewegungsmeßmechanikunterteils PL (XL,YL,ZL), PR (XR,YR,ZR) und PV (XV,YV,ZV) wurden bereits unter 4.8. definiert.

Zu projizierender Unterkieferpunkt P = (X,Y,Z)

$$\text{Punkt P im Ausgangszustand } (i=1) \quad P = P(1) = \begin{matrix} X(1) \\ Y(1) \\ Z(1) \end{matrix}$$

Mit der Laufvariable i=1 wird berechnet:

$$PL(1) = \begin{matrix} XL(1) \\ YL(1) \\ ZL(1) \end{matrix} \qquad PR(1) = \begin{matrix} XR(1) \\ YR(1) \\ ZR(1) \end{matrix}$$

Mit den Einheitsvektoren: ex, ey, ez

$$ex(1) = \begin{matrix} xx(1) \\ xy(1) \\ xz(1) \end{matrix} \qquad ey(1) = \begin{matrix} yx(1) \\ yy(1) \\ yz(1) \end{matrix} \qquad ez(1) = \begin{matrix} zx(1) \\ zy(1) \\ zz(1) \end{matrix}$$

Ausgangskoordinaten PA = P(1)-(PL(1)+PR(1)))/2 = (XA,YA,ZA)

$$XA = X(1)-(XL(1)+XR(1))/2$$
$$YA = Y(1)-(YL(1)+YR(1))/2$$
$$ZA = Z(1)-(ZL(1)+ZR(1))/2$$

Projektion von PA auf die Einheitsvektoren:

$$PX := PA\ ex(1) = XA\ xx(1) + YA\ xy(1) + ZA\ xz(1)$$
$$PY := PA\ ey(1) = XA\ yx(1) + YA\ yy(1) + ZA\ yz(1)$$
$$PZ := PA\ ez(1) = XA\ zx(1) + YA\ zy(1) + ZA\ zz(1)$$

Berechnung des zu projizierenden Punktes P (X,Y,Z) bei fortlaufendem Index i :

$$P(i) = (PL(i)+PR(i))/2 + PX\ ex(i) + PY\ ey(i) + Pz\ ez(i)$$

$$ex(i)=\begin{pmatrix} xx(i) \\ xy(i) \\ xz(i) \end{pmatrix} \quad ey(i)=\begin{pmatrix} yx(i) \\ yy(i) \\ yz(i) \end{pmatrix} \quad ez(i)=\begin{pmatrix} zx(i) \\ zy(i) \\ zz(i) \end{pmatrix}$$

$$PL(i)=\begin{pmatrix} XL(i) \\ YL(i) \\ ZL(i) \end{pmatrix} \quad PR(i)=\begin{pmatrix} XR(i) \\ YR(i) \\ ZR(i) \end{pmatrix}$$

hieraus ergibt sich:

$$X(i) = (XL(i)+XR(i))/2 + PX\ xx(i) + PY\ yx(i) + PZ\ zx(i)$$
$$Y(i) = (YL(i)+YR(i))/2 + PX\ xy(i) + PY\ yy(i) + PZ\ zy(i)$$
$$Z(i) = (ZL(i)+ZR(i))/2 + PX\ xz(i) + PY\ yz(i) + PZ\ zz(i)$$

Mit dieser kurzen Beschreibung der Projektionsroutine soll ein kleiner Einblick in die mathematischen Formeln gegeben werden. Das Computerprogramm setzt sich aus einer Vielzahl weiterer Unterprogramme zusammen. Diese alle einzeln zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es seien an dieser Stelle deshalb nur einige Unterprogramme ihrer Funktion nach genannt:

- Koordinatenbestimmung für Infraorbitalpunkt und beliebige Unterkieferpunkte
- Scharnierachslokalisation mit anschließender Kondylenlokalisation (Näherungsverfahren)
- Berechnung von Kondylenbahnneigung (HCN), Bennett-Winkel und Immediate Side Shift
- Orthogonale Projektion und Darstellung der Bewegungsbahnen
- Dienstprogramme für Drucker- und Plotter-Ansteuerung

10. Literaturverzeichnis

1. Bewersdorf, H.J. Elektrognathographie. Dtsch. Zahn-, Mund- und Kieferheilk. 48, 100 (1967)

2. Bewersdorf, H.J. Elektronische dreidimensionale Messung und Registrierung von Kieferbewegungen. Med. Diss. Stockholm 1969

3. Körber, K.H. Elektronische Registrierung der Unterkieferbewegungen im normalen und okklusionsgestörten Gebiß. Dtsch. zahnärztl. Z. 26, 167 (1971)

4. Heners, M. Ein elektronisches Verfahren zur Registrierung von sagittalen Grenzbewegungen des Unterkiefers. Dtsch. zahnärztl. Z. 28, 532 (1973)

5. Jankelson, B. Swain, C. Crane, P. Radke, J. Kinesiometric instrumentation : A new technology. J. Amer. dent. Ass. 90, 834 (1975)

6. Goodson, J.M. Johannsen, E. Analysis of human mandibular movements Monographs in oral science Basel, 1975, S.Karger

7. Lemmer, J. Lewin, A. van Rendsburg, L. The measurement of jaw movement. J. prosth. dent. 36, 211 (1976)

8. Heners, M. Elektronische Untersuchungen zur dreidimensionalen Bewegung des Unterkiefers. Dtsch. zahnärztl. Z. 32, 104 (1977)

9. Machens, J. Elektronische Untersuchungen zur biologischen Toleranz der Unterkiefergrenzbewegungen. Dtsch. zahnärztl. Z. 34, 789 (1979)

10. Waysenson, B.
Salomon, J.
Three-dimensional recordings of envelopes of motion related to mandibular movements.
J. prosth. Dent. 38, 52 (1977)

11. Salomon, J.
Waysenson, B.
Computer-monitored radionuclide tracking of three-dimensional mandibular movements.
J. prosth. dent. 41, 340 (1979)

12. McCoy, R.B.
Shryock, E.F.
Lundeen, H.C.
A method of transfering mandibular-movement data to computer storage.
J. prosth. dent. 36, 510 (1976)

13. Karlsson, S.
Recording of mandibular movements by intraorally placed L. E. diodes.
Acta odont. scand. 35, 111 (1977)

14. Lundeen, H.C.
Shryock, E.F.
Gibbs, C.H.
An evaluation of mandibular border movements: Their character and significance.
J. prosth. dent. 40, 442 (1978)

15. Roedema, W.H.
Knapp, J.G.
Spencer, J.
Dever, M.
Computer-graphic representation of mandibular movements in three dimensions.
J. prosth. dent. 39, 378 (1978)

16. Jemt, T.
Karlsson, S.
Mandibular movements of young adults recorded by intraorally placed light emitting diodes.
J. prosth. dent. 42, 669 (1979)

17. Gibbs, C.H.
Lundeen, H.C.
Mahan, P.E.
Chewing movement in relation to border movements at the first molar.
J. prosth. dent. 46, 308 (1981)

18. Hofmann, M.
Pröschel, P.
Unterkieferdynamik und Kaumuster von Totalprothesenträgern und Vollbezahnten.
Dtsch. zahnärztl. Z. 37, 763 (1982)

19. Ohlrogge , H.
Elektronische Registrierung.
Dtsch. zahnärztl. Z. 37, 263 (1982)

20. Klett, R. Elektronisches Registrierverfahren für die Kiefergelenksdiagnostik. Dtsch. zahnärztl. Z. 37, 991 (1982)

21. Klett, R. Projektionsfehler bei der Winkelmessung mit Scharnierachsschreibern. Dtsch. zahnärztl. Z. 37, 482 (1982)

22. Sörgel, W. Okklusale Differenzen bei fehlregistrierten Scharnierachspunkten. Med. Diss. Tübingen 1978

23. Jankelson, B. Measurement accuracy of the mandibular kinesiograph. A computerized study. J. prosth. dent. 44, 656 (1980)

24. Gernet, W. Funktionsanalysen im stomatognathen System. München; Wien : Hanser (1982)

25. Messermann, T. A means for studying mandibular movements. J. prosth. dent. 17, 36 (1967)

26. Messermann, T. Breswick, I.B. Gibbs, Ch. Investigation of functional mandibular movements. Dental clinics of North America 13/3 (1969)

27. Gibbs, Ch. Messermann, T. Reswick, J.B. Derda, H.J. Functional movements of the mandible. J. prosth. dent. 26, 604 (1971)

28. Provost, A.W. Towle, H.J. Determination of physiologic rest position by electronic measurement. J. prosth. dent. 27, 377 (1972)

29. Knap, F.J. Abler, J.H. Richardson, B.L. Computerized analysis and duplication of mandibular motion. J. prosth. dent. 33, 535 (1975)

30. Posselt, U. Studies in the mobility of the human mandible. Acta. odont. scand. 10, suppl. 10,1 (1952)

31. Posselt, U. Terminal hinge movement of the mandible. J. prosth. dent. 7, 787 (1957)

32. Lee, R.L. Jaw movements engraved in solid plastic for articulator controls. J. prosth. dent. 22, 209 (1969)

33. Kubein, D. Krüger, W. Stachniss, V. Die Repanthographie. Zahnärztl. Welt 88, 101 (1979)

34. Krüger, W. Kubein, D. Stachniss, V. Scharnierachsenbewegungen - Simulationsgrenzen verschiedener Artikulatorgelenktypen. Zahnärztl. Welt 88, 116 (1979)

35. Ott, K. Geometrisch-klinische Analyse der Kiefergelenkfunktion mit Hilfe der Pantographie nach Stuart. Habil. Schr. Erlangen (1980)

36. Ott, K. Quantitative Auswertung von Aufzeichnungen nach Stuart-Pantographie. Dtsch. zahnärztl. Z. 32, 218- (1977)

37. Bauer, A. Gutowski, A. Gnathologie. Quintessenz Verlag, Berlin (1975)

38. Schmidseder, J. Motsch, A. Registrierung der Unterkieferbewegung. Quintessenz Verlag, Berlin (1982)

39. Ingraham, R. Solnit, A. Computerized Pantography. 10th Congr. Internat. Acad. Gnathol., Scottsdale, Arizona, USA (1981)

40. Hobo, S. Computerized Electrical Mandibular Recording System. 10th Congr. Internat. Acad. Gnathol., Scottsdale, Arizona, USA (1981)

41. Lauritzen, A.G. Atlas of occlusal analysis.
HAH Publications 1974

42. Körber, E.
Landt, H. Untersuchungen über die Reproduzierbarkeit von Registrierungen.
Dtsch. zahnärztl. Z. 34, 202 (1979)

Computertechnische Literatur:

43. Analog Devices Data-Acquisition Databook 1982
Vol. 1 : Integrated Circuits
Vol. 2 : Modules-Subsystems
Norwood, MA 02062, U.S.A.

44. Booth, K.S. Computer Graphics
IEEE Catalog Nr. EHO 147-9
IEEE Computer Society
1979, Long Beach, CA., U.S.A.

45. Lien, D.A. The BASIC handbook
Compusoft Publishing
1978, San Diego, CA., U.S.A.

46. Rockwell International Co. R6500 Microcomputer System Programming Manual
Doc. No. 29650N30 Rev.0
1977, Anaheim, CA., U.S.A.

47. Newman, W.M.
Sproull, R.F. Principles of Interactive Computer Graphics
2nd ed., New York, McGraw-Hill (1979)

48. Rogers, D.F.
Adams, J.A. An Introduction to Computer Graphics
New York, McGraw-Hill (1977)

49. Giloi, W.K. Interactive Computer Graphics
Englewood Cliffs, Prentice-Hall (1978)

50. Verdina, J. Projective Geometry and Point Transformations.
Allyn and Bacon, Boston, U.S.A. (1971)

Danksagung

Herrn Prof. Dr. E. K ö r b e r danke ich für die Überlassung des Themas sowie für die grosszügige Unterstützung und Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit.
Die Entwicklung eines so komplexen Systems wie das ECRS wäre ohne die Unterstützung fachfremder Mitarbeiter kaum zu verwirklichen gewesen.
An dieser Stelle danke ich recht herzlich Herrn Dipl.Phys. Hans O e l k r u g. Er hat mir bei der mathematisch theoretischen Systemanalyse und Formulierung des Programms entscheidend geholfen.
Mein weiterer Dank gilt Herrn Dr.D. P a u l vom Institut für Informationsverarbeitung der Fraunhofergesellschaft in Karlsruhe, sowie Herrn Bernd K o r n m e s s e r .
Sie waren mir bei der Systemanalyse und Schaltungkonfigurationen des Interfaces sehr behilflich.
Für die vielen Anregungen bei der Lösung fachspezifischer Probleme möchte ich mich besonders bei Herrn OA Dr. W.B. F r e e s m e y e r bedanken.
Abschließend sage ich auch Frl. K. M a y meinen Dank für die Anfertigung der Schemazeichnungen.

Lebenslauf

Am 1. August 1956 wurde ich, Alexander Luckenbach, als Sohn des Dipl.-Agraringenieurs Siegfried Luckenbach und seiner Ehefrau Gertraud Luckenbach, geb. Hirsch, in Heidenheim an der Brenz geboren.
Die ersten 5 Jahre meiner Kindheit verbrachte ich in den USA (San Antonio / Texas).
Von 1963 bis Herbst 1966 besuchte ich in Karlsruhe die Grundschule, ab 1966 bis Herbst 1971 das Helmholtz-Gymnasium.
Der Umzug nach Heidenheim hatte einen Schulwechsel in das naturwissenschaftliche Max-Planck-Gymnasium zur Folge. Hier bestand ich im Frühjahr 1976 das Abitur.
Vom Wehrdienst befreit,begann ich im Wintersemester 1976/77 in Tübingen das Studium der Zahnheilkunde.
Im Herbst 1977 legte ich die naturwissenschaftliche Vorprüfung, im Herbst 1979 die zahnärztliche Vorprüfung ab. Mein Studium schloß ich am 16. Dezember 1981 mit dem Staatsexamen ab.
Seit Februar 1982 arbeite ich als wissenschaftlicher Angestellter in der Abteilung für zahnärztliche Prothetik des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde / Tübingen.

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45